Centre de recherche sur les transports (C.R.T.)
*Centre for Research on Transportation*

**CRT-2006-27**

# LES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES DU TRANSPORT MARITIME : UNE REVUE DE LA LITTÉRATURE

**par**

**Caroline Denis**
**Rachel Desrochers**

**Décembre 2006**

Université de Montréal
C.P. 6128, succursale Centre-ville, Montréal QC H3C 3J7 Canada
Téléphone : (514) 343-7575 / Télécopieur : (514) 343-7121

crt@crt.umontreal.ca
www.crt.umontreal.ca

HEC MONTRÉAL · ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL · Université de Montréal

2007-00276

**PUBLICATION**
**CRT-2006-27**

# LES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES DU TRANSPORT MARITIME : UNE REVUE DE LA LITTÉRATURE

par

**Caroline Denis**[1]
**Rachel Desrochers**[1]

Cette recherche a été subventionnée par le ministère des Transports du Québec.

1. Département de géographie et Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT), Université de Montréal, C.P. 6128, succursale Centre-ville, Montréal, Canada H3C 3J7 (caroline.denis1, rachel.desrochers@umontreal.ca)

Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada, 2006

**Résumé**

Depuis 1990, il s'est développé un intérêt marqué pour les impacts environnementaux engendrés par la navigation commerciale. L'objectif de cette revue de la littérature est d'identifier les émissions atmosphériques des navires, de comprendre l'importance de cet enjeu et d'évaluer les axes de recherche privilégiés par les auteurs. Les axes de recherche relevés se scindent en cinq champs d'intérêt soit la typologie des polluants, les mesures des émissions, les méthodes techniques et incitatives de réduction des émissions polluantes et les coûts qui sont associés aux émissions atmosphériques. Dans une perspective de développement durable, le transport maritime demeure une option valable pour le mouvement des marchandises. Mais des efforts technologiques et législatifs supplémentaires doivent être entrepris pour diminuer les impacts négatifs associés à cette activité.

Mots-clés: transport maritime, environnement, émissions atmosphériques.

**Abstract**

Since the 1990s, there is a growing interest on the environmental impact of maritime shipping. The objective of this literature review is to identify the atmospheric emissions of marine shipping, to understand their importance and to evaluate research options proposed by authors. The research axes identified cover the typology of pollutants, emissions measures, technical based solutions, and incentive based solutions and costs associated with atmospheric emissions. In the context of sustainable development, shipping remains a viable option for the movement of goods. But technological and legislatives efforts will be required to counterbalance the negative environmental impacts of marine transport.

Key words: marine transport, environment, air emissions.

# Table des matières


**INTRODUCTION** ..... 1

**REVUE BIBLIOGRAPHIQUE** ..... 2

NATURE DES DOCUMENTS ..... 2
RÉSUMÉ DES DOCUMENTS ..... 2
ÉVALUATION DES DOCUMENTS ..... 3

**1. DESCRIPTION DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE DES NAVIRES** ..... 4

1.1 TYPOLOGIE DES POLLUANTS ..... 4
1.2 IMPACTS ASSOCIÉS À LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE DES NAVIRES ..... 6
*1.2.1 Impacts sur la santé* ..... 7
*1.2.2 Impacts environnementaux* ..... 8

**2. MESURE DES ÉMISSIONS** ..... 9

2.1 QUANTIFICATION DES ÉMISSIONS ..... 9
2.2 LOCALISATION DES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES DES NAVIRES ..... 11

**3. MÉTHODES TECHNIQUES DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS POLLUANTES** ..... 11

3.1. MESURES OPÉRATIONNELLES ..... 14
*3.1.1 Réduction de la consommation de carburant* ..... 14
*3.1.2 Utilisation de carburant alternatif* ..... 18
3.2. MESURES TECHNIQUES POUR RÉDUIRE LA CONSOMMATION DE CARBURANT ..... 19
*3.2.1 Réduction des émissions de $NO_x$* ..... 19
*3.2.2 Réduction des émissions de $SO_x$* ..... 23
*3.2.3 Réduction des émissions de particules* ..... 24

**4. INCITATIFS À LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS POLLUANTES** ..... 25

4.1 APPROCHE LÉGISLATIVE ..... 27
4.2 APPROCHE BASÉE SUR LE MARCHÉ ..... 29
*4.2.1 Échange de crédits d'émissions* ..... 30
*4.2.2 Analyse comparative (Benchmarking)* ..... 30
*4.2.3 Système d'échange et de plafonnement des émissions (Cap and trade)* ..... 31
*4.2.4 Taxation selon la performance environnementale* ..... 32
*4.2.5 Imposition de frais en route (En-route charging)* ..... 33
4.3 APPROCHE VOLONTAIRE ..... 33

**5. COÛT DE LA POLLUTION** ..... 34

5.1 INFRAS/IWW ..... 34
5.2 BICKEL ET AL ..... 35
5.3 GALLAGHER ..... 36

**CONCLUSION** ..... 36

**BIBLIOGRAPHIE** ..... 37

## Introduction

Les efforts entrepris pour favoriser un développement durable accroissent la pression sur l'industrie du transport de marchandises pour qu'elle réduise ses impacts sur l'environnement. Bien qu'utilisant un mode de transport dit vert, les transporteurs maritimes doivent aussi réviser certaines de leurs pratiques afin de rester compétitifs face aux autres modes. Les émissions atmosphériques produites par le transport maritime sont l'un de ces enjeux environnementaux. Un intérêt marqué s'est développé durant la dernière décennie pour cette préoccupation; ce qui s'est traduit par une vaste littérature portant sur les émissions atmosphériques produites par le transport maritime. Il s'impose de faire le point sur ce qui s'est écrit afin de comprendre quelles sont les tendances qui sous-tendent la recherche et reconnaître les solutions envisagées pour diminuer les émissions polluantes de la flotte de navires. À cette fin, cette revue de la littérature, portant spécifiquement sur les émissions atmosphériques des navires de marchandises, expose les conclusions d'un certain nombre de travaux. Le travail comporte trois volets :

- Description et évaluation des différents travaux et rapports étudiés
- Explication et mise en contexte des émissions atmosphériques des navires
- Résumé des principaux thèmes de recherche

Ce travail devrait permettre d'identifier les émissions atmosphériques des navires, de comprendre l'importance de cet enjeu et d'évaluer les axes de recherche privilégiés.

## Revue bibliographique

Nature des documents

Notre revue de la littérature renvoie à une synthèse formée de plus d'une centaine d'articles scientifiques, rapports et autres publications portant sur la pollution atmosphérique en provenance des navires. De l'ensemble ces documents, nous pouvons cerner trois faits :

- Les textes sont en grande partie rédigés en anglais et proviennent en majorité de pays européens.

- Les documents ne sont pas tirés de revues spécialisées en pollution navale, mais plutôt d'une gamme de différents domaines tels l'économie, l'ingénierie, les transports, l'environnement, la santé et la politique.
- Conséquemment à la grande variété de domaines impliqués dans le sujet de recherche, ces écrits forment une revue très diversifiée et composée de textes à la fois descriptifs, analytiques ou encore de synthèse.

Résumé des documents

Malgré l'origine internationale et diversifiée des textes, nous pouvons cerner quatre champs d'intérêt spécifique qui attirent particulièrement l'attention des chercheurs. Ceux-ci sont ordonnés selon leur importance en fonction du nombre de fois que nous avons trouvé le sujet dans les textes.

1) Description de la pollution atmosphérique des navires (typologie des polluants et impacts négatifs).
2) Mesures des émissions (quantification et localisation).
3) Méthodes techniques de réduction des émissions polluantes.
4) Incitatifs à la réduction des émissions polluantes.
5) Coût de la pollution.

D'autre part, nous avons remarqué une nette séparation à l'intérieur des différents textes formant la revue littéraire. Les rapports abordent quasi uniquement les technologies et les incitatifs afin de réduire les émissions tandis que les articles scientifiques réunissent une plus grande variété de sujets tels que la typologie, les impacts, la quantification, la localisation et les coûts associés aux émissions atmosphériques des navires.

Évaluation des documents

La littérature étudiée s'adresse avant tout à un public scientifique. En effet, le lecteur doit comprendre le champ lexical de l'industrie maritime, être à l'aise avec la lecture de tableaux et connaître minimalement les incidences des émissions atmosphériques. Nous avons constaté que l'ensemble des textes ne permettait pas encore d'envisager des actions concrètes pour diminuer les émissions puisque les auteurs en sont encore au stade de saisir le phénomène dans son ensemble. Certaines incertitudes persistent

puisque plusieurs techniques n'ont pas encore été testées sur des navires existants. En somme, les préoccupations environnementales concernant les émissions dans le domaine du transport maritime restent à ses balbutiements.

## 1. Description de la pollution atmosphérique des navires

Le thème qui revient le plus souvent dans la littérature sur les émissions atmosphériques des navires est la typologie des polluants, c'est-à-dire que les textes consultés expliquent la formation des polluants émis ainsi que leurs impacts sur l'environnement et la santé. Il y a un consensus certain sur ce thème qui n'est plus tant un sujet de recherche qu'une mise en contexte pour pratiquement tous les articles ou rapports traitants des émissions des navires.

### 1.1 Typologie des polluants

La combustion du carburant dans les moteurs des navires produit des émissions atmosphériques. Ces émissions sont composées principalement d'azote ($N_2$), d'oxygène ($O_2$), de vapeur d'eau ainsi que de dioxyde de carbone ($CO_2$) ; en plus mince proportion, il y a aussi des particules fines (PM), des acides de soufre ($SO_x$), des acides d'azote ($NO_x$), du monoxyde de carbone (CO), des hydrocarbones (HC) ainsi que quelques autres (Reynolds, 2004). La littérature scientifique s'intéresse principalement aux $NO_x$, aux $SO_x$, aux particules fines et aux $CO_2$. Les $NO_x$ et $SO_x$ sont étudiés parce qu'ils sont particulièrement émis en grande quantité par les navires proportionnellement aux autres sources d'émissions. Les $CO_2$ sont étudiés quant à eux parce que des efforts considérables sont entrepris par la communauté internationale afin de réduire l'émission des principaux gaz à effet de serre. L'importance relative de chaque polluant est différente selon les régions à cause d'un ensemble de facteurs dont *the climate of the regions, meteorological characteristics, local ecosystems, proximity to communities, and the composition of the local emissions sources* (Fournier, 2006).

Les acides d'azote ($NO_x$) proviennent de l'oxydation de l'azote dans l'air du moteur ou de l'azote organique compris dans le carburant. Les émissions de $NO_x$ dépendent donc principalement des conditions de combustion à l'intérieur du moteur ainsi que de la vitesse du moteur (Cooper, 2003). La température est un élément important de la création de $NO_x$. Plus la température est élevée à l'intérieur du moteur plus l'oxygène

oxydera l'azote contenu dans l'air du moteur pour former les $NO_x$ soit principalement des NO et $NO_2$. La vitesse est un autre élément crucial de la formation des $NO_x$. À mesure que la vitesse du moteur ralentit, plus grande serait la production de $NO_x$ (Lin et Lin, 2006). Par exemple, Carlton *et al.* (1995 *in* Corbett et Fischbeck, 1997) ont estimé qu'un moteur à vitesse moyenne, *medium-speed engine*, émet environ 57 kg de $NO_x$ par tonne de carburant consommé tandis qu'un moteur à faible vitesse, *slow-speed engine*, en émet environ 87 kg.

Les acides de soufre ($SO_x$) proviennent principalement de l'oxydation du soufre contenu dans le carburant. La plupart des $SO_x$ émis sont du dioxyde de soufre ($SO_2$). Les émissions de $SO_2$ dépendent donc de la quantité de soufre contenu dans le carburant (Cooper, 2003). La part de soufre contenue dans le carburant utilisé par les navires est de loin supérieure à la quantité que l'on retrouve dans le carburant employé par les camions. La quantité moyenne de soufre dans le carburant résiduel varie de région en région. En 2002, il variait de 1,90% en Amérique du Sud à 3,07% en Asie avec une moyenne internationale de 2,68% (Endresen *et al.*, 2005). Cette distinction est le résultat de l'absence de législation sur cet aspect environnemental du transport maritime. Les transporteurs maritimes avaient tout intérêt à consommer ce carburant peu dispendieux puisque plus de 50% des coûts d'opération d'un navire sont reliés à l'achat de diesel (Lin et Lin, 2006). L'industrie maritime utilise du diesel conçu spécifiquement pour eux depuis 1973 en raison de la crise du pétrole qui a mené vers la recherche d'une réduction du coût de carburant. Conséquemment, l'industrie utilise une variété de carburants contenant des niveaux de soufre assez élevé que ce soit le diesel résiduel ou le diesel provenant d'une deuxième distillation de la matière première (Corbett et Fischbeck, 1997). Au total, les émissions de $SO_x$ par les navires représentent 16% de toutes les émissions produites par l'utilisation du pétrole (Corbett et Fischbeck, 1997).

Les émissions de fines particules sont composées de *inorganic and organic substances largely comprising elemental carbon, ash minerals and heavy metals, plus a variety of non- or partially combusted hydrocarbons from ships' fuel and lubricating oils* (Reynolds, 2004). Les émissions de fines particules dépendent à la fois des conditions de combustion et de la quantité présente dans le carburant, quoique ce dernier facteur soit

de moindre importance comparée à la portée qu'il occupe pour les $SO_2$ et $CO_2$ (Cooper, 2003). L'émission de particules n'est pas, à l'heure actuelle, soumise à une législation internationale (Eyring *et al.*, 2005).

Les émissions de $CO_2$ proviennent de l'oxydation des hydrocarbones contenus dans le carburant (Reynolds, 2004). Les émissions de $CO_2$ dépendent donc de la quantité de carbone contenue dans le carburant (Cooper, 2003). Le transport maritime international représente près de 2% de la production de $CO_2$ émis, par la combustion de carburant fossile (Marintek *et al.*, 2000). De 1995 à 2001, la consommation de carburant ainsi que la production de $CO_2$ ont augmenté plus rapidement que le nombre de navires puisque la force moyenne des moteurs a augmenté pour passer de 2,81 à 3,2 MW/navires pour les navires de plus de 100 Gt comparativement à 2,72 en 1980 (Eyring *et al.*, 2005). Certaines mesures, notamment pour réduire les $NO_x$, engendrent une augmentation de la consommation de carburant et par conséquent une hausse de la production de $CO_2$. Ce phénomène démontre qu'il faut être prudent en mettant en place des mesures de réduction pour diminuer un polluant afin de ne pas trop augmenter les émissions des autres polluants (Eyring *et al.*, 2005b).

### 1.2 Impacts associés à la pollution atmosphérique des navires

Les mouvements de camions, trains et bateaux en milieu portuaire entraînent une forte demande en consommation de carburant. Conséquemment, ce transport engendre des émissions polluantes qui nuisent aux écosystèmes et à la population environnante. Afin de mieux comprendre les enjeux associés à ces divers polluants, la revue de la littérature traite des impacts négatifs associés à la pollution atmosphérique des navires.[1] Ces rapports ne sont pas entièrement voués à l'étude des impacts dommageables, mais les abordent comme cadre contextuel. Globalement, les auteurs classifient les principaux impacts selon deux catégories distinctes soit les impacts sur la santé et ceux sur l'environnement.

[1] Bailey et Solomon, 2004 ; BMT, 2000 ; Bode *et al.*, 2002 ; Capaldo *et al.*, 1999 ; Colvile *et al.*, 2001 ; Commission of the European communities, 2002 ; Comtois et Slack, 2005 ; Corbett, 2003 ; EEB, 2002 ; Friends of the Earth International, 2005 et 2006; Hensher et Button, 2003 ; Marintek, 2000 ; Marmer, 2005 ; Reynolds, 2004 ; Kunzli *et al.*, 2000; Tran, 2006.

*1.2.1 Impacts sur la santé*

À travers la revue de la littérature, les principaux agents nuisibles pour la santé humaine s'avèrent être, en ordre d'importance, les PM, les $NO_x$ et les $SO_x$. Malgré le manque d'information précise sur la quantité et la qualité des émissions des navires, les auteurs se sont basés sur des données extrapolées pour estimer les problèmes de santé occasionnés par l'industrie maritime (Reynolds, 2004).

- La présence de $NO_x$ dans l'air provoque l'inflammation des poumons, des irrégularités respiratoires, la mort prématurée et des problèmes cardiovasculaires (Colvile, 2001 ; Bailey, 2004). Selon Kunzli *et al.* (2000), les jeunes qui habitent près des ports, contractent huit fois plus de problèmes d'asthme que la normale dû à cet agent polluant. De plus, puisque le $NO_x$ est un agent potentiel de formation du smog, une autre gamme de dommages corporels y est associée;

> *[...] chest pain, coughing, shortness of breath, reduced lung function, inflammation and other changes of lung tissue, increased hospital admissions [...] impaired immune systems, and exacerbation of asthma-related symptoms (Friends of the Earth International, 2005)*

- Le $SO_x$ dans l'air réagit avec la vapeur d'eau qui conduit à la formation d'aérosols acides. Ces aérosols acides créent des inconforts au niveau pulmonaire et peuvent mener à la perte de 25 à 30 % de la fonction des poumons des personnes asthmatiques (Bailey et Solomon, 2004).

- Les particules en provenance du diesel brûlé causent des problèmes de santé pouvant dégénérer jusqu'à la mort (EEB, 2004 ; Townsend *et al.*, 2005 ; Friends of the Earth International, 2006 ; Hensher et Button, 2003). Parmi ceux-ci, nous retrouvons :

> *Premature cardiovascular mortality, lung cancer death, [...] host of respiratory and cardiovascular problems, such as heart rhythms, atherosclerosis, stroke and permanent respiratory damage.* (Friends of the Earth International, 2005)

EEB *et al.* (2004) estiment que les émissions de particules en provenance des navires contribuent de 20 et 30 % de la concentration totale des particules dans les zones à proximité des voies maritimes commerciales.

*1.2.2 Impacts environnementaux*

Les activités de l'industrie maritime représentent le mode de transport qui enregistre le moins de répercussions négatives sur l'environnement. Néanmoins, ces activités rejettent annuellement des millions de tonnes de polluants dans l'atmosphère (Comtois et Slack, 2005). D'ailleurs, ces émissions détiennent la capacité de se déplacer pendant de longues durées de temps, et ce, sur une superficie étendue. Cette situation entraîne conséquemment plusieurs impacts environnementaux. Une gamme d'auteurs[2] a répertorié trois types d'impacts environnementaux associés aux émissions atmosphériques des activités maritimes. Ils sont ordonnés selon une hiérarchie du plus important au moins important, comme étant la qualité de l'air, du sol et de l'eau.

- *Qualité de l'air* : La revue de la littérature accorde une importance grande aux impacts environnementaux des émissions atmosphériques, notamment les impacts climatiques (Friends of the Earth International, 2006 ; Bailey et Solomon, 2004). Le $CO_2$ représente la variable la plus soulignée. Marintek *et al.*, (2000) et Colvile (2001) estiment que le $CO_2$ rejeté par les navires contribue à 1,8 % du changement climatique global. Ce phénomène se définit comme étant un *changement de climat directement ou indirectement attribuable à l'activité humaine, qui modifie la composition de l'atmosphère mondiale et s'ajoute à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables* (CCNUCC, 2006). D'autre part, le $NO_x$ et les particules se définissent comme des gaz à effet de serre. Ceux-ci agissent comme couche isolante, maintenant la température à la surface de la Terre au-dessus des moyennes normales. Ces polluants contribuent conséquemment au réchauffement planétaire (Commission of the European Communities *et al.*, 2002 ; Comtois et Slack, 2005 ; Friends of the Earth International, 2005).

- *Qualité du sol* : Par ailleurs, il importe de souligner que les émissions atmosphériques exercent également un impact sur la qualité du sol. Les propriétés acidifiantes du $SO_x$ et du $NO_x$ entraînent la transformation de nombreux écosystèmes indigènes ou encore des terres agricoles qui ne détiennent plus la résilience nécessaire (Marshall, 2005 ; Friends of the Earth International, 2005). Selon EEB (2004),

[2] Bailey et Solomon, 2004 ; Colville, 2001 ; Commission of the European Communities, 2002 ; Comtois et Slack, 2004 ; EEB, 2004-2002 ; Friends of the Earth, 2006 ; Marintek, 2000 ;Marshall, 2005

l'acidification des côtes longeant les principales voies maritimes, par exemple en mer du Nord ou en mer Baltique, provient à 50 % du trafic maritime. Les immeubles et différents matériaux sont à leur tour soumis à un taux de corrosion accéléré en contact avec ces polluants. D'autre part, le $NO_x$ et le $SO_x$ produisent des effets d'eutrophisation. *L'eutrophisation signifie l'enrichissement excessif d'une masse d'eau ou d'un sol donnant lieu à une production de matière organique trop abondante pour être entièrement éliminée par les processus d'autoépuration. L'eutrophisation peut se produire naturellement ou être accélérée par une augmentation de la charge en éléments nutritifs [...] due à des activités humaines* (Environnement Canada, 2005). En Europe, EEB *et al.* (2004 et 2002) estiment que les émissions des navires accentuent le phénomène d'eutrophisation de 50 % au pourtour de la mer Méditerranée.

- *Qualité de l'eau :* Les propriétés acidifiantes des émissions des navires affectent également la qualité de l'eau et dépassent communément la norme exigée. Selon EEB *et al.* (2004), le phénomène d'eutrophisation est aussi présent dans les milieux aquatiques environnant les activités portuaires, fragilisant ainsi les différents écosystèmes présents.

## 2. Mesure des émissions

En terme du nombre d'articles scientifiques publiés, l'aspect le plus étudié des émissions atmosphériques produites par le transport maritime concerne la quantification des émissions atmosphériques soit; de mesurer l'ampleur du phénomène et de le cartographier. La quantification des émissions soulève la controverse puisque les différents chercheurs n'arrivent pas aux mêmes résultats selon la méthodologie utilisée et les bases de données employées.

### 2.1 Quantification des émissions

Bien que le transport maritime transporte plus de 95% des marchandises échangées dans le monde (Pisani, 2002), ce mode de transport utilise uniquement 16% du carburant consommé par tous les modes (Eyring et al., 2005). À ce chapitre, pour un litre de carburant, une tonne de marchandises est transportée par bateau sur plus de 200 km par rapport à moins de 25 km si le mode de transport est le camion (US

Department of transportation, 2002 *in* SODES, 2003). Cet énoncé s'explique par une question de capacité : *une barge intérieure peut transporter 15 fois plus de tonnage de marchandises qu'un wagon et 60 fois plus qu'un camion* (*Ibid.*).

Malgré ces bonnes performances énergétiques, le transport maritime demeure un moyen de transport polluant, notamment au chapitre des $NO_x$ et des $SO_2$. Pour certains États côtiers, la situation est telle que les émissions de $NO_x$ et de $SO_2$ produites par les navires sont supérieures à la somme de toutes les sources terrestres d'émissions (Wismann *in* Saxe et Larsen, 2004). La part relative des émissions des navires est appelée à augmenter en raison des efforts entrepris pour réduire les $NO_x$ du transport routier, par exemple :

> *Technical and operational measures have a limited potential for contributing to reduced emissions from ships. If the increase in demand for shipping services and market requirement for increased speed and availability continues, technical measures alone will not be able to prevent a total growth in emissions from ships.* (Marintek *et al.*, 2000)

La revue de la littérature révèle que l'inventaire des émissions des navires résulte de la multiplication d'un facteur d'émission de chaque polluant par la consommation de carburant des navires. Le facteur d'émission est le résultat de la mesure des émissions à partir soit d'instruments à bord du navire ou à partir de données théoriques calculées grâce aux caractéristiques du moteur. La littérature révèle qu'il existe deux approches qui se confrontent pour calculer la consommation de carburant des navires. Une première approche dite *top-down* vise à mesurer le carburant consommé à partir du volume de vente du carburant. La seconde approche, *bottom-up*, vise à estimer la consommation de carburant à partir de l'étude des trajets de la flotte de navires en fonction des caractéristiques des navires comme la force du moteur ainsi que le nombre d'heures et le profil des opérations (Corbett and Koehler, 2003).

Il existe certaines difficultés qui nuisent à la comparaison des différentes études sur la quantification des émissions. La comparaison entre les résultats des différentes recherches sur le sujet des émissions est difficile notamment en raison de différentes définitions attribuées aux navires eux-mêmes. L'analyse de contenu de la littérature souligne que les scientifiques n'étudient pas exactement les mêmes navires, leurs résultats sont forcément différents (Eyring *et al.*, 2005). De plus, les différentes échelles

d'étude nuisent à la comparabilité des résultats, une étude régionale se transposant mal à l'échelle internationale et vice-versa (Corbett et Koehler, 2003). Il y a aussi de l'incertitude vis-à-vis des sources de données que ce soit pour calculer les déplacements de la flotte ou alors le facteur d'émission (Taylor, 2005). Dans le cas de l'approche *top-down*, la principale difficulté est de faire correspondre le montant total du carburant vendu à travers le monde (Marintek *et al.*, 2000). Une dernière lacune soulignée dans la littérature est le manque de vérifications sur le terrain de la quantité d'émissions atmosphériques des navires (Cooper, 2005).

### 2.2 Localisation des émissions atmosphériques des navires

Les émissions atmosphériques se produisent le long des trajets des navires. À titre d'exemple, la pollution de $SO_x$ émise se retrouve surtout dans l'hémisphère nord, le long des côtes est et ouest américaines, en Europe du Nord ainsi que dans le nord du Pacifique (Marintek *et al.*, 2000). Les effets ressentis des émissions sur les écosystèmes côtiers proviennent surtout des navires circulant dans les eaux territoriales puisque la majorité des polluants se déposent dans un rayon près de la source qui les émet. Ainsi, près de 100% des polluants émis par les navires se déposent à 12 miles nautiques de la source d'émissions (Swinden (1995) *in* BMT, 2002). Selon Corbett (1999), environ 70% des émissions sont produites à moins de 400 km des côtes. Plusieurs variables influencent cette dispersion des émissions:

> *the dispersion of the $NO_x$ and $SO_x$ emissions are a function of local meteorological conditions and of the parameters controlling the emissions itself. For ships these are stack (funnel) height, funnel diameter, flue gas temperature and velocity.* (BMT, 2002)

## 3. Méthodes techniques de réduction des émissions polluantes

Par souci d'amélioration des performances environnementales de l'industrie maritime, quelques changements au niveau des pratiques commerciales s'imposent. Afin de mieux cerner ces alternatives, cette section du texte brosse un portrait global des différentes mesures d'atténuation des émissions polluantes des navires apparaissant dans la revue de la littérature.

Malgré que cette sphère d'étude soit récente, plusieurs groupes de recherche et auteurs se sont intéressés aux différentes actions envisageables pour diminuer les émissions des navires[3]. En observant cette succession d'auteurs, nous constatons que ces études ont majoritairement été élaborées par des firmes de recherche plutôt que par des auteurs scientifiques indépendants. Ils ont répertorié complémentairement plus d'une vingtaine de mesures d'atténuation des émissions polluantes, qui sont aujourd'hui utilisées ou encore à un stade de développement embryonnaire. À travers ces différents rapports, les auteurs insistent sur le fait qu'il est plus facile d'appliquer les techniques sur les nouveaux navires que de vouloir moderniser les anciens navires.

Afin de mieux schématiser l'ensemble des mesures de réduction des émissions polluantes, la figure 1 synthétise les techniques les plus couramment rencontrées au cours de la recherche bibliographique. Elles sont répertoriées selon deux grandes catégories identifiées comme étant les mesures opérationnelles et techniques. Les mesures opérationnelles (première et deuxième colonne de la figure 1) sont à leur tour subdivisées en deux sous-catégories soit par les mesures qui visent la réduction de la consommation de carburant et par les mesures faisant appel à l'utilisation de carburant renouvelable. Quant aux mesures techniques, elles sont scindées en trois sous-catégories associées à la diminution de la teneur en $NO_x$, $SO_x$ et PM (troisième, quatrième et cinquième colonnes de la figure 1). À l'intérieur de chacune des sous-catégories, chaque technique a été hiérarchisée en fonction du nombre de fois à laquelle nous l'avons rencontrée dans la littérature. Plus leur fréquence est grande plus la technique se retrouvera en tête de liste.

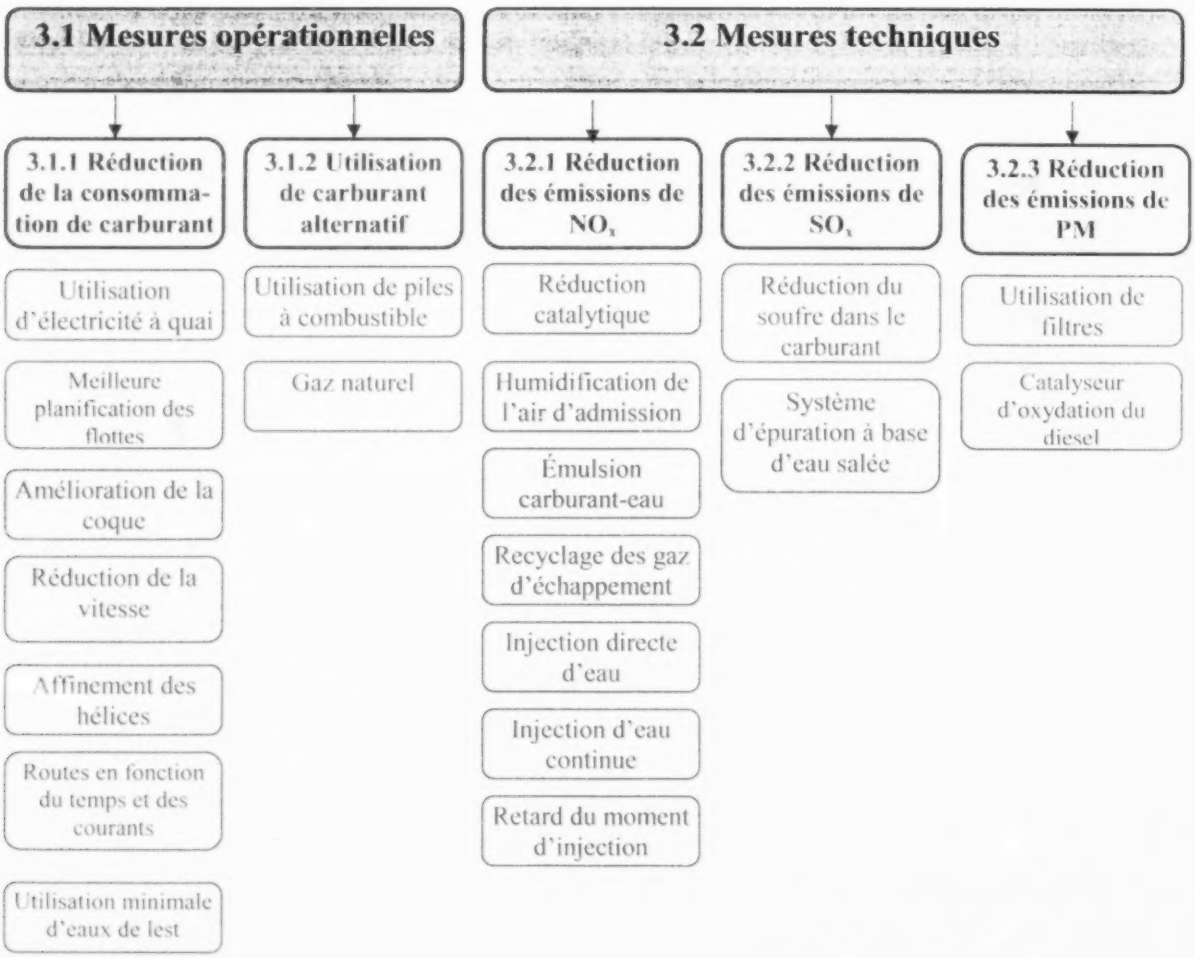
Les méthodes de réduction du $CO_2$ sont très peu abordées dans la littérature à l'exception de Marintek *et al.* (2000) qui y accordent un volet spécifique. Dans ce rapport, les techniques de réduction du $CO_2$ sont les mêmes que les techniques utilisées pour les autres polluants. En effet, la réduction d'un type de polluant peut

---

[3] Bailey et Solomon, 2004 ; Blue water network *et al.*, 2004; BMT, 2005; Bode *et al.*, 2002; Cheminfo, 2000 ; Commission of the European communities, 2002 ; EEB, 2004 ; EEB Clear air, 2002; Entec UK Limited, 2005 ; Environ, 2005; Christiansen et al, 2004 ; Fleetway, 2005; Fraser, 2004; Lovblad et Fridell, 2006; Fournier, 2006; Friends of the Earth International, 2005-2006; Goldsworthy, 2002; Gordon, 2005; Gore et al., 2002; Helsinki Commission, 2005; Innovation maritime, 2006; Marintek, 2000; Marintek Review, 2001; Mariterm AB, 2004 ; Nera, 2005; North Sea Commission, 2005; Optimar, 2004; Seaat, 2005; Taylor, 2005 ; Transport Canada, 2006; Tronstad, 2004; Trozzi et Vaccaro, 1998; US department of transportation, 2005; Wilhelmsen, 2005; Young, 2006.

entraîner la diminution ou même l'augmentation d'un autre. Conséquemment, nous n'élaborerons pas sur les techniques de réduction du $CO_2$ de part leur quasi absence dans la littérature.

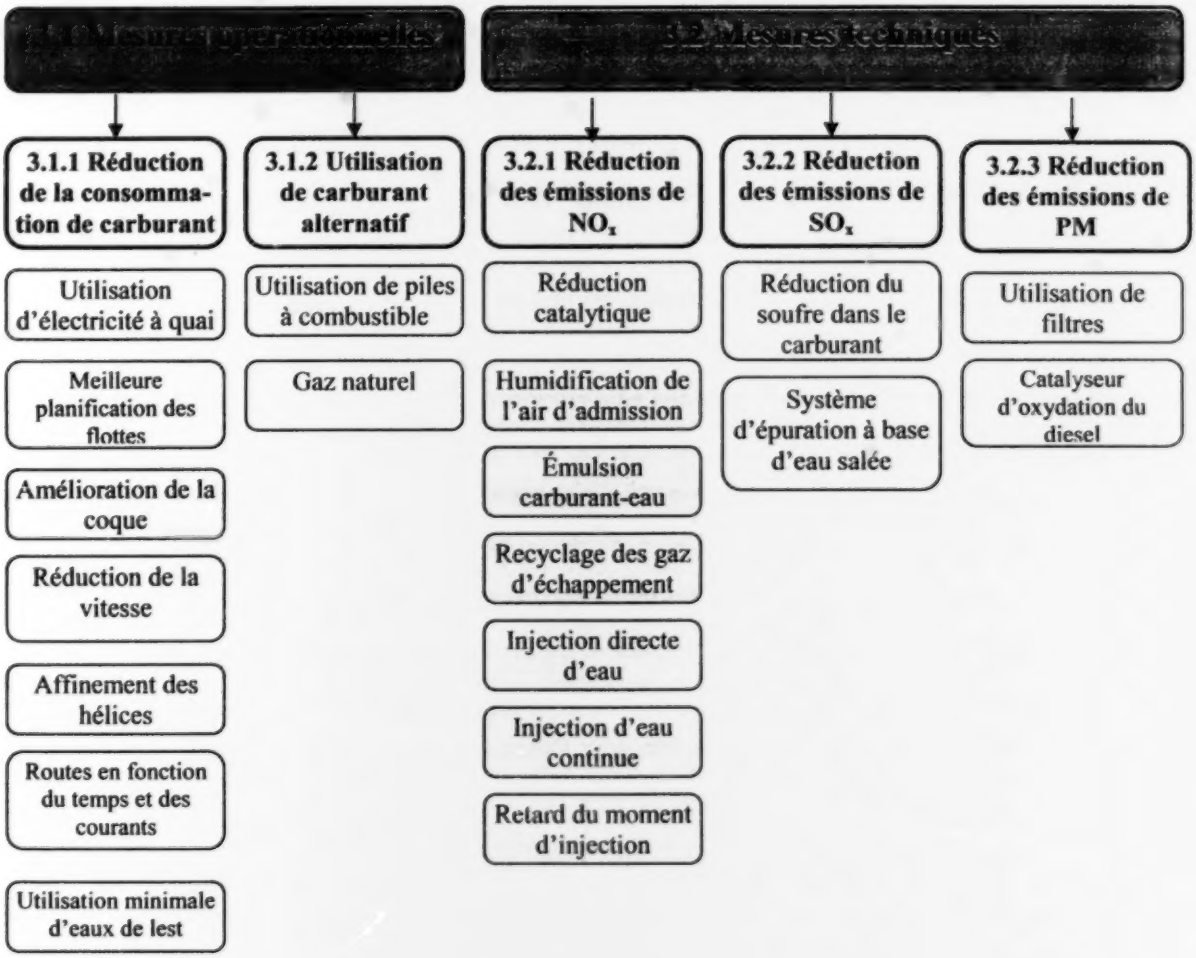
**Figure 1 : Méthodes techniques de réduction des émissions polluantes**




Comme les mesures de réduction des émissions polluantes forment un volet important de la revue de la littérature, il était essentiel de les aborder dans ce travail. Pour bien interpréter chaque mesure, nous avons suivi le même ordre qui apparaît à la figure 1.

entraîner la diminution ou même l'augmentation d'un autre. Conséquemment, nous n'élaborerons pas sur les techniques de réduction du $CO_2$ de part leur quasi absence dans la littérature.

**Figure 1 : Méthodes techniques de réduction des émissions polluantes**




Comme les mesures de réduction des émissions polluantes forment un volet important de la revue de la littérature, il était essentiel de les aborder dans ce travail. Pour bien interpréter chaque mesure, nous avons suivi le même ordre qui apparaît à la figure 1.

## 3.1. Mesures opérationnelles

Les mesures opérationnelles représentent l'amélioration de certaines pratiques commerciales adoptées par l'industrie du transport maritime. Elles sont scindées en deux catégories soit les mesures associées à la réduction de la consommation de carburant et celles liées à l'utilisation de carburant alternatif.

### *3.1.1 Réduction de la consommation de carburant*

La quantité de carburant consommée pourrait se voir diminuer selon le degré d'efficacité de chaque mesure. Conséquemment, la quantité de pollution émise se verra proportionnellement diminuée. La revue de la littérature démontre qu'il existe neuf mesures opérationnelles permettant la réduction de la consommation de carburant.

- *Utilisation d'électricité à quai* : Lors du transbordement des marchandises, les navires doivent laisser fonctionner les moteurs pour générer l'électricité nécessaire au fonctionnement des pompes, lumières, réfrigérateurs et ventilateurs (Bailey, 2004 ; EEB, 2004 ; Seaat, 2005a). Conséquemment, plus un navire prendra de temps au quai, plus il émettra de polluants atmosphériques, qui directement affecteront la population environnante. Deux solutions s'imposent : diminuer le temps d'accostage ou utiliser l'électricité à quai comme énergie alternative. Pour s'approvisionner en électricité, les navires peuvent accéder à l'électricité par l'entremise d'un câble flexible qui rejoint la berge ou par l'installation d'une génératrice à bord même du navire. (MaritermAB, 2004; Entec UK Limited, 2005).

Au sein de la revue de la littérature, les auteurs identifient les principaux bénéfices comme étant la réduction des émissions polluantes et du bruit, qui conséquemment se traduisent par des bénéfices au niveau de la santé de la population et des écosystèmes environnants (Bluewater Network *et al*, 2004). Selon Marintek *et al.* (2000), l'alimentation terrestre des navires diminue de 1-2 % les émissions polluantes émises.

D'autre part, les coûts d'investissement direct et de maintenance à envisager peuvent s'élever de deux à quatre fois plus dispendieux que de laisser fonctionner les moteurs à quai. Ces estimations varient en fonction des taxes sur l'électricité changeante d'un pays à l'autre, en fonction des types de navires et du mode de production de l'électricité utilisé (ex. énergie éolienne versus charbon). Néanmoins, MaritermAB (2004) et North

Sea Commission (2005) évaluent que les coûts externes liés à la pollution engendrée par les navires pourraient se voir diminuer de 15 à 75 fois. Outre le problème du coût, quelques désavantages persistent avec l'utilisation de l'électricité à quai tel que le manque de standardisation internationale des installations, l'occupation d'espace supplémentaire à quai, les préoccupations face à la sécurité des employés et la perte fréquente de courant (Helsinki Commission, 2005).

Plusieurs exemples d'application d'électricité à quai ont été abordés dans la littérature. Il s'agit de la compagnie Pohang Iron and Steel en Californie, de quelques navires en Alaska, de terminaux aux ports de Göteborg et de Los Angeles, et de deux exemples en cours d'exécution au port de Lubeck en Allemagne et au port de Pitea en Suède (Friends of the Earth, 2006). Exemple intéressant, le port de Göteborg utilise en partie l'énergie éolienne pour alimenter les navires (Port of Göteborg, 2006). Nous constatons également un grand nombre de compagnies de croisières, qui par conviction marketing, adopte cette pratique puisqu'elle renvoie une image positive au grand public (Taylor, 2005 ; Environ International Corporation *et al*, 2005).

- Meilleure planification des flottes : La plupart des auteurs intéressés à la planification logistique se sont majoritairement penchés sur le volet des bénéfices économiques engendrés par la planification des flottes. Parallèlement, Christiansen (2004), Optimar (2004), Marintek *et al.* (2000), Marintek (2001) ; Wilhelmsen, 2005 et Maritime Innovation (2006) ont également considérés les bienfaits environnementaux associés à l'adoption d'une telle mesure. Ce concept renvoie à la planification des flottes de navires à leur pleine capacité afin de diminuer les voyages inutiles. Afin d'y parvenir, il est nécessaire de choisir le bon nombre et la bonne taille des navires sur la voie maritime la plus favorable. En maximisant ainsi le potentiel de remplissage des navires, le nombre de trajets se voit proportionnellement diminué et conséquemment la quantité de polluants atmosphériques le devient également. Marintek *et al.* (2000) estiment qu'il est possible d'atteindre des diminutions de consommation de carburant de l'ordre de 5 à 40 %. Les concepts d'alliance, de fusion et d'acquisition renvoient à ce concept. Ce principe de planification des flottes requiert cependant des systèmes logistiques de fines pointes qui ne seront pas abordés dans cette revue de la littérature.

- *Amélioration de la coque* : Afin d'atténuer la résistance des navires sur l'eau, la coque des embarcations est judicieusement profilée dans l'intention de prévenir les organismes qui s'y adhéreraient. Ce profilage se traduit par la diminution de la consommation de carburant et conséquemment par la décroissance des émissions polluantes. Malgré les nombreuses études concernant son amélioration, Marintek *et al.* (2000) et Seaat (2005a) estiment qu'il existe encore des mesures pour optimiser l'efficacité de la coque.

D'autre part, afin de diminuer la résistance exercée sur la coque du navire, la peinture antisalissure et le re-profilage de la courbe de la coque sont des alternatives envisageables. Selon Kågeson (2001), Marintek *et al.* (2000), Bode *et al.* (2002), Seaat (2005a) et la Commission européenne (2005) l'entretien et l'application de peinture autopolissante peuvent engendrer une économie de carburant se situant autour de 3 à 5 % et de 5 à 20 % en améliorant la courbe de la coque. Toutefois, la peinture antisalissure peut entraîner des effets néfastes sur les écosystèmes marins. À cet effet, à partir de 2008, tous les navires se verront dans l'obligation d'employer une peinture sans Tributyltin (Wilhelmsen, 2005).

- *Réduire et minimiser les variations de vitesse* : Les auteurs Kågeson (2001), Marintek *et al.* (2000), Bode *et al.* (2002), Wilhelmsen (2005) et la Commission européenne (2005) mentionnent que la quantité d'émissions polluantes d'un navire est fonction de la quantité de carburant utilisée. Or, plus la vitesse d'un navire est grande, plus sa consommation de carburant sera imposante. Force est de reconnaître qu'il apparaît avantageux de maintenir la vitesse des navires, autant d'un point de vue environnemental qu'économique, puisqu'on abaisserait à la fois la quantité d'émissions rejetées et le montant alloué au carburant. Marintek *et al.* (2000) estiment qu'en maintenant une vitesse de croisière constante, le taux de consommation de carburant diminuerait de 0 à 2 %. Par contre, deux notions tendent à s'opposer dans cette pratique. Il y a le besoin de livrer la marchandise dans un concept de juste-à-temps par opposition aux bienfaits de limiter la vitesse des navires à des fins environnementales.

- *Affinement du design des hélices* : Les hélices sont tenues de recevoir un entretien adéquat, car l'efficacité des hélices tend à diminuer en fonction de son taux de rugosité (Wilhelmsen, 2005 ; Kågeson, 2001 ; Bode *et al.*, 2002 ; Seaat, 2005a). D'autre

part, afin de maximiser le taux de propulsion des navires, les hélices doivent également être conformes à la grandeur et au type d'embarcation. Dans la plupart des cas, les ingénieurs navals ont comblé cette exigence. Marintek *et al.* (2000) estime que le potentiel de réduction de consommation de carburant par l'entretien des hélices est de 0 à 2 % d'économie.

- *Élaboration des routes maritimes en fonction du temps et des courants (marées)* : Les principales routes maritimes demeurent à ce jour connues et utilisées par l'ensemble des flottes navales. Or, les variables temps et courants restent communément omises dans la planification des trajets. Il existe aujourd'hui un système de planification des flottes qui indique le meilleur itinéraire à choisir en fonction du temps et des courants entre un point de départ et un point d'arrivée donné (Seaat, 2005a ; Wilhelmsen, 2005 ; Bode *et al.*, 2002). En évitant ainsi les contre-courants et les conditions météorologiques défavorables, Marintek *et al.* (2000) estime qu'il est possible d'atteindre une diminution de consommation de carburant de l'ordre de 2 à 4 %. Selon les estimations de McCord (1992), en considérant les courants marins dans l'élaboration des routes transatlantiques et transpacifiques, il serait possible de diminuer le coût de carburant des flottes mondiales de 80 millions de dollars US par année.

Toutefois, les résultats sont variables en fonction du savoir-faire de l'équipage à bord, de la connaissance approfondie des routes maritimes et de la longueur du trajet. Innovation maritime (2006) estime aussi que l'élaboration des routes maritimes en fonction des marées engendrerait possiblement une perte de temps afin de se synchroniser avec les facteurs météorologiques.

- *Utiliser le minimum d'eaux de lest* : Peu d'auteurs abordent cette technique dans la littérature (Marintek *et al.*, 2000 ; Bode *et al.*, 2002). Cette mesure consiste à réduire le poids du navire en abaissant la quantité d'eaux de lest à bord. En diminuant ainsi la charge du navire, la quantité de carburant nécessaire au déplacement de l'embarcation sera moindre. Selon Marintek *et al.* (2000), il est possible d'économiser de 0 à 1% la consommation de carburant. Cependant, il s'agit d'une opération risquée puisqu'en abaissant la quantité d'eaux de lest, la sécurité de l'embarcation peut être remise en cause.

Afin de schématiser le potentiel de l'ensemble des techniques proposées, le tableau 1 représente le potentiel de réduction du carburant en fonction des mesures utilisées.

**Tableau 1: Potentiel de réduction du carburant en fonction des mesures utilisées**

| Options | Économie potentielle en carburant |
|---|---|
| Utilisation d'électricité à quai | 1-2% |
| Planification des flottes | 5-40% |
| Amélioration de la coque | 3-5% |
| Contrôle de la vitesse | 0-2% |
| Affinement des hélices | 0-2 % |
| Élaboration des routes en fonction du temps | 2-4% |
| Réduire la quantité d'eaux de lest | 0-1% |

Source : Marintek *et al.*, 2000

*3.1.2 Utilisation de carburant alternatif*

La proportion de certains agents polluants rejetés dans l'atmosphère est fonction de la qualité du carburant utilisé afin de faire fonctionner les moteurs des navires. Un simple changement dans la nature du carburant entraîne des bénéfices au niveau environnemental. Dans l'intention de substituer l'utilisation de mazout lourd, la revue de la littérature identifie deux principaux types de carburant renouvelables soit la pile à combustible et le gaz naturel.

- Pile à combustible: *The fuel cells [...] utilize hydrogen as working media in the cell itself. However, different fuels can be used/stored onboard (i.e. methanol) but then a reformer is needed to separate and supply pure hydrogen to the cell* (Marintek *et al.*, 2000, North Sea Commission, 2005). La firme BMT (2005) et Seaat, (2005a) estiment qu'il est possible d'éliminer la quasi-totalité des émissions polluantes en ayant recours à la pile à combustible. Toutefois, ces estimations restent spéculatives, puisqu'il n'existe aucun exemple d'application de pile à combustible à bord d'un navire à ce jour. Cette difficile application se justifie par le fait que cette technologie requiert des coûts d'investissements très élevés pour des résultats qui restent encore à prouver (Friends of the Earth, 2005 ; Bailey et Solomon, 2004, Tronstad, 2004).

- *Gaz naturel* : L'utilisation de gaz naturel comme moyen alternatif au mazout lourd, demeure une procédure qui siège depuis plus de dix ans dans le monde naval. Le gaz naturel présente l'avantage d'être très accessible sur le marché puisqu'il représente la plus grande réserve de carburant dans le monde. Marintek *et al.* (2000) et le US Department of Transportation (2005) estiment que pour un même voyage, la quantité de $CO_2$ diminuera de 400 tonnes, de 27 tonnes pour le $NO_x$ et de 25 tonnes pour le $SO_x$ par rapport au mazout lourd. Toutefois, son utilisation nécessite de l'espace additionnel afin de procéder à l'installation de nouvel équipement. De plus, la quantité de gaz nécessaire au fonctionnement des navires reste plus élevée que le mazout lourd. Par conséquent, il devient plus compliqué de bien planifier les pleins.

## 3.2. Mesures techniques pour réduire la consommation de carburant

Les mesures techniques représentent l'utilisation de dispositifs élaborés afin de réduire les émissions polluantes en provenance des navires. Les différents articles scientifiques et rapports formant la revue de la littérature ont scindé ces techniques en trois grandes catégories soit les mesures de réduction applicables aux $NO_x$, aux $SO_x$ et aux particules.

### *3.2.1 Réduction des émissions de $NO_x$*

La revue de la littérature expose essentiellement six mesures techniques permettant de réduire la part de $NO_x$ présente dans les émissions des navires. Nous retrouvons une mesure qui traite les émissions à la sortie du tuyau d'échappement et cinq effectives lors de la combustion. Il est important de mentionner que l'efficacité et le coût des techniques diffèrent d'un type de navire à un autre et que les résultats sont susceptibles de fluctuer entre une embarcation déjà existante versus en construction (Marintek *et al.*, 2000).

- *Réduction catalytique sélective* : La réduction catalytique sélective demeure la seule technique qui abaisse la part de polluant après la combustion du carburant. Elle réduit la part de *$NO_x$ présent dans les rejets atmosphériques des navires, par l'ammoniac en présence d'un catalyseur, dans les gaz d'échappement chauds des moteurs marins* (Cheminfo, 2000). Cette mesure permet d'éliminer presqu'entièrement la présence de $NO_x$ dans les émissions des navires, avec des taux de réduction de

l'ordre de 70 à 100 %[4]. Toutefois, les coûts d'installation et d'opération restent très élevés (Transport Canada, 2006 ; Fraser *et al.*, 2004). Sommairement, ce dispositif a fait ses preuves à grande échelle et il est possible de retrouver, depuis 1989, plus de 300 navires (surtout en mer Baltique) qui utilisent ce système (Lovblad et Fridell, 2006).

- *Humidification de l'air d'admission* : Le système d'humidification de l'air d'admission représente une technologie qui consiste en *l'alimentation d'un moteur diesel marin en air de combustion quasi saturée de vapeur d'eau* (Cheminfo, 2000). Cette intervention permet de diminuer la part de $NO_x$ émise par les navires de l'ordre de 60 à 80 % (Helsinki Commission, 2004 ; North Sea Commission, 2005 ; Fournier, 2006 ; Marintek, 2001; Fraser *et al.*, 2004 ; Friends of the Earth, 2006; EEB, 2004). Malencontreusement, il apparaît difficile d'implanter cette technique sur des embarcations déjà existantes puisqu'elle nécessite de nombreux réaménagements et un besoin d'espace additionnel (Marintek *et al.*, 2000). Depuis 1997, nous pouvons dénombrer plusieurs exemples d'application d'une telle mesure sur différents types d'embarcation (Lovblad et Fridell, 2006).

- *Émulsion carburant-eau* : La technique d'émulsion carburant-eau représente l'injection d'eau au carburant du moteur afin d'en réduire la température et proportionnellement d'en diminuer la part d'agents polluants émis. Le procédé consiste à mélanger l'eau au mazout, de chauffer ce mélange et de l'injecter dans le moteur (Cheminfo, 2000 ; Marintek, 2001; Marintek *et al.*, 2000). Il permet de réduire de 30 à 50 % la présence de $NO_x$ dans les émissions et de réduire de 15 % les fines particules rejetées (North Sea Commission, 2005 ; Trozzi et Vaccaro 1998 ; Friends of the Earth, 2005). Le système d'émulsion carburant-eau peut facilement être installé à bord des navires. De plus, le système d'émulsion carburant-eau, tel qu'indiquer au tableau 2, renvoie à un coût modéré (Transport Canada, 2006). Nous retrouvons cette technique sur quelques navires de croisières et embarcation de marchandises (Helsinki Commission, 2004 ; Fournier, 2006 ; Goldsworthy, 2002).

---

[4] Friends of the Earth, 2006; EEB, 2004 ; Heksinki, 2004 ; North Sea Commission, 2005 ; Fournier, 2006 ; Gore, 2002 ; Young, 2006 ; US Department of Transportation, 2005 ; Trozzi et Vaccaro, 1998 ; Goldsworthy, 2002

- *Recyclage des gaz d'échappement*: La technologie de recyclage des gaz d'échappement *brûle les gaz d'échappement du moteur qui ont été refroidis en aval du turbocompresseur. Cela réduit la température de combustion et accroît le débit massique et la pression et, ce faisant, réduit la formation de $NO_x$* (Cheminfo, 2000). Il est possible d'atteindre des réductions de $NO_x$ de l'ordre de 30 à 50 % (Trozzi et Vaccaro 1998 ; Entec, 2005a ; Helsinki Commission, 2004 ; Goldsworthy, 2002 ; Friends of the Earth, 2006). Quoique couramment employée pour le camionnage, cette technologie est rarement utilisée sur les navires commerciaux puisqu'elle est liée à des problèmes d'encrassement et de corrosion des moteurs (Marintek *et al.*, 2000, Marintek, 2001; Fraser *et al.*, 2004).

- *Injection directe d'eau*: *L'injection d'eau, immédiatement avant l'injection de mazout, dans le cycle de combustion, refroidit le cylindre et réduit la formation de $NO_x$* (Cheminfo, 2000). À l'aide de cette technique, il est possible de diminuer de 40 à 60 % la part de $NO_x$ rejetée dans l'atmosphère (Marintek *et al.*, 2000 ; Friends of the Earth, 2006 ; Trozzi et Vaccaro, 1998 ; Fournier, 2006). Toutefois, il existe l'éventualité de rencontrer une augmentation de particules dans les émissions (Environnement Canada, 2003). D'un autre côté, ce procédé ne peut être qu'installé sur des navires en construction. Comme Wartsila, un des plus grands fabricants de moteurs marins au monde, en détient le brevet, ce système n'existe que sur des navires compatibles avec cette compagnie. En 2005, 23 navires se sont dotés du système d'injection directe d'eau (Lobvlad et Fridell, 2006).

- *Injection continue d'eau* : Cette méthode fait appel à la vapeur d'eau pour réduire les émissions de $NO_x$. Son fonctionnement est fort simple puisqu'il s'agit *d'injecter une fine vapeur d'eau directement dans l'air chaud comprimé en aval du turbocompresseur* (Cheminfo, 2000). L'injection continue d'eau permet de diminuer le $NO_x$ de 30 % et les particules de 25 % (Marintek *et al.*, 2000). Le tableau 2 révèle qu'il est possible d'obtenir une économie des coûts en carburant, puisqu'en injectant de l'eau au système, la quantité nécessaire de carburant devient moindre. Parmi les différentes mesures techniques, l'injection continue d'eau s'avère la méthode la moins dispendieuse. Néanmoins, elle détient le plus faible potentiel de réduction des émissions de $NO_x$

(Transport Canada, 2006). Il existe peu d'exemples d'application d'un tel système à ce jour, mais nombreux sont les tests de démonstration, tel les BC ferries.

- *Retard du moment d'injection*: *By retarding timing the premixed burning phase is shortened, combustion temperature and pressure reduced and thus resulting in reduced formation of $NO_x$* (Marintek *et al.*, 2000). En effectuant un retard de l'injection, la quantité de $NO_x$ présente dans les émissions devient susceptible de diminuer de l'ordre de 10 à 35 % (Trozzi et Vaccaro, 1998 ; Goldsworthy, 2002). Toutefois, elle engendre une augmentation des particules. En somme, cette technique demeure aujourd'hui couramment utilisée.

Afin de schématiser la performance de l'ensemble des techniques proposées, le tableau 2 représente le coût et l'efficacité des différentes approches abordées.

**Tableau 2 : Coûts et efficacité des différentes techniques de réduction de $NO_x$.**

| | Coûts après installation ($) | Coûts/ (économies) d'exploitation ($/an) | Coûts/économies annualisés ($/an) | Réduction des $NO_x$ (%) | Coût unitaire ($/t $NO_x$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Réduction catalytique sélective | 1 156 000$ | 306 000$ | 436 000$ | 70-100% | 552$ |
| Humidification de l'air d'admission | 1 048 000$ | 1 500$ | 120 000$ | 60-80% | 206$ |
| Émulsions carburant-eau | 325 000$ | 54 000$ | 91 000$ | 30-50% | 217$ |
| Humidification de l'air d'admission | 1 048 000$ | 1 500$ | 120 000$ | 60-80% | 206$ |
| Recyclage du gaz d'échappement | Non disponible | Non disponible | Non disponible | 50% | Non disponible |
| Injection directe d'eau | Non disponible | Non disponible | Non disponible | 40-60% | Non disponible |
| Injection continue d'eau | 51 000$ | (32 000$) | 26 000$ | 10-30% | (143$) |
| Retard du moment d'injection | Non disponible | Non disponible | Non disponible | 10-35% | Non disponible |

Source : Cheminfo, 2000

### *3.2.2 Réduction des émissions de $SO_x$*

La quantité de $SO_x$ retrouvée dans les émissions atmosphériques est proportionnelle à la quantité de soufre présente dans le carburant. Puisque le combustible le plus couramment utilisé dans la flotte maritime demeure le mazout lourd, la proportion moyenne de soufre présent dans le carburant représente 2,7%[5] (Friends of the Earth International, 2005). Afin de réduire cette part de polluant dans le carburant, la revue de la littérature souligne deux alternatives soit ; de diminuer la proportion de soufre à même le carburant ou de traiter les émissions à leur sortie.

- *Réduction du soufre dans le carburant* : Afin de diminuer la quantité de soufre présente dans le carburant, il existe actuellement trois méthodes qui sont ordonnées dans le texte selon leur coût, allant du moins dispendieux au plus coûteux. Il s'agit de mélanger le mazout lourd avec du carburant à faible teneur en soufre, d'utiliser essentiellement du carburant à faible teneur en $SO_x$ ou de désulfurer le mazout lourd (Bailey et Solomon, 2004; EEB, 2004 ; Seaat, 2005a). À l'aide de ces techniques, Friends of the Earth (2005) estiment qu'il est possible de diminuer la teneur en soufre de 80 à 90 % comparativement au diesel traditionnel. Additionnée aux bienfaits environnementaux, l'utilisation de carburant à faible taux de soufre permet une réduction des coûts associés à l'entretien, puisque la quantité de résidus accumulés dans les moteurs est beaucoup plus faible. De par les vertus stérilisantes du carburant à faible taux de soufre, l'efficacité du moteur deviendra à son tour améliorée (EEB, 2002, Marintek *et al.*, 2000). D'autre part, en réduisant le taux de soufre, la quantité de particules diminuera de 40 % (Friends of the Earth, 2005 ; Wilhelmsen, 2005). Toutefois, le coût du carburant à faible taux de soufre demeure plus élevé que le carburant traditionnel (Taylor, 2005). En somme, il est possible de retrouver en grande majorité des navires qui utilisent du diesel à faible teneur en soufre dans le port d'Helsinki en Suède ou encore au port d'Oakland aux États-Unis (Bailey et Solomon, 2004).

---

[5] Il existe une grande quantité de catégories de carburants ayant des proportions de soufre différentes. Dans sa recherche, le groupe Entec UK Limited (2005) utilise une moyenne de 2,7% pour le *residual oil*, de 1% pour le *marine distillate oil* et de 0,5% pour le *marine gas oil*. De plus, pour chacune de ces catégories, plusieurs taux de soufre peuvent se retrouver.

- *Système d'épuration à base d'eau salée*: *The scrubber transfers the oxides of sulfur from the exhaust gas to the water. After scrubbing, the water is filtered to remove particulates, which are trapped and collected for disposal* (EEB, 2004). Ce système permet de diminuer la quantité de soufre dans les émissions polluantes de l'ordre de 70 à 95 % (Friends of the Earth International, 2005; Nera, 2005). Toutefois, lors du traitement, il se crée un agent acidifiant qui risque de causer des problèmes de corrosion à bord du navire (Lovblad et Fridell, 2006). De plus, il semblerait que le soufre capturé à l'aide de l'épurateur des eaux marines se retrouve en partie dans l'eau (BMT, Appendix 5, 2000). D'autre part, ce processus demande des frais et de l'espace additionnels afin d'installer le nouvel équipement nécessaire (Marintek *et al.*, 2000 ; Seaat, 2005). Considérant ces nombreux désavantages, il n'existe pas beaucoup d'exemples d'application à ce jour (Lovblad et Fridell, 2006).

### *3.2.3 Réduction des émissions de particules*

La revue de la littérature n'accorde pas une grande part de ses recherches au traitement des particules à bord des navires. Néanmoins, deux méthodes de réduction des particules ont été retenues. Il s'agit de l'utilisation de filtres et de l'application de catalyseurs d'oxydation du diesel.

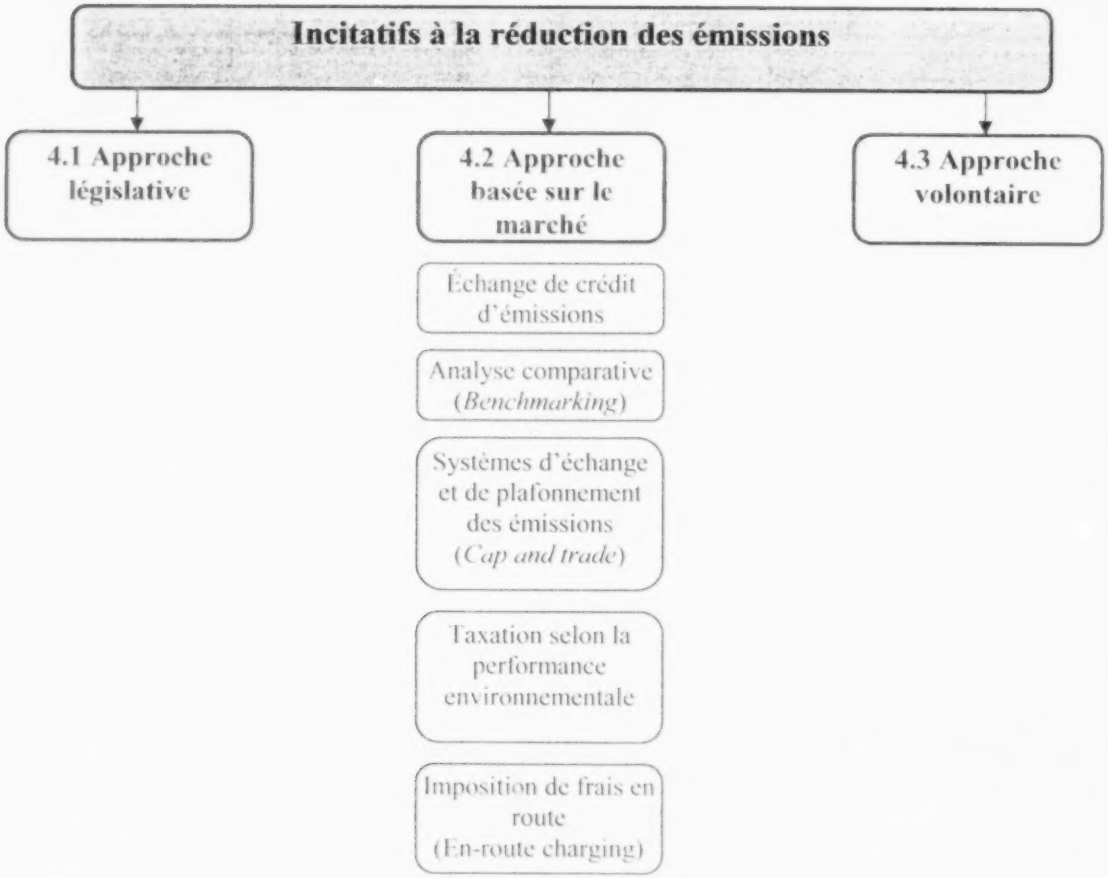
- *Filtres* : L'utilisation de filtres à bord des navires représente le moyen le plus efficace pour diminuer la part des particules rejetées. Ce dernier a la capacité d'arrêter les particules de l'ordre de 50 à 99 % (US Department of Transportation, 2005; Friends of the Earth, 2005; Bailey et Solomon, 2004). Cependant, cette méthode ne peut être applicable pour les navires de grandes tailles puisqu'il n'existe pas de filtre ajustable pour ce type de navires. Néanmoins, cette technologie a fait ses preuves dans l'industrie du camionnage et Friends of the Earth International (2005) estiment qu'elle sera bientôt disponible pour l'industrie maritime.

- *Catalyseur d'oxydation du diesel* : Le catalyseur d'oxydation du diesel est peu abordé dans la littérature. Néanmoins, le US Department of Transportation (2005) et Friends of the Earth International (2005) estiment que l'utilisation du catalyseur permet de diminuer de 20 à 50 % les particules contenues dans les émissions. Les exemples d'applications de catalyseur restent absents de la littérature.

## 4. Incitatifs à la réduction des émissions polluantes

En plus des méthodes de réduction des émissions polluantes, la revue de la littérature révèle d'autre part l'importance de la mise en place d'incitatifs afin d'encourager l'amélioration de la performance environnementale de la flotte des navires par rapport à la pollution atmosphérique. Tel que démontré par la figure 2, ces incitatifs se divisent en trois sous-groupes soit les approches législatives, les approches basées sur le marché ou les approches volontaires. La littérature aborde principalement l'évaluation de ces différents incitatifs afin de les instaurer en vue d'une réduction des émissions des navires.

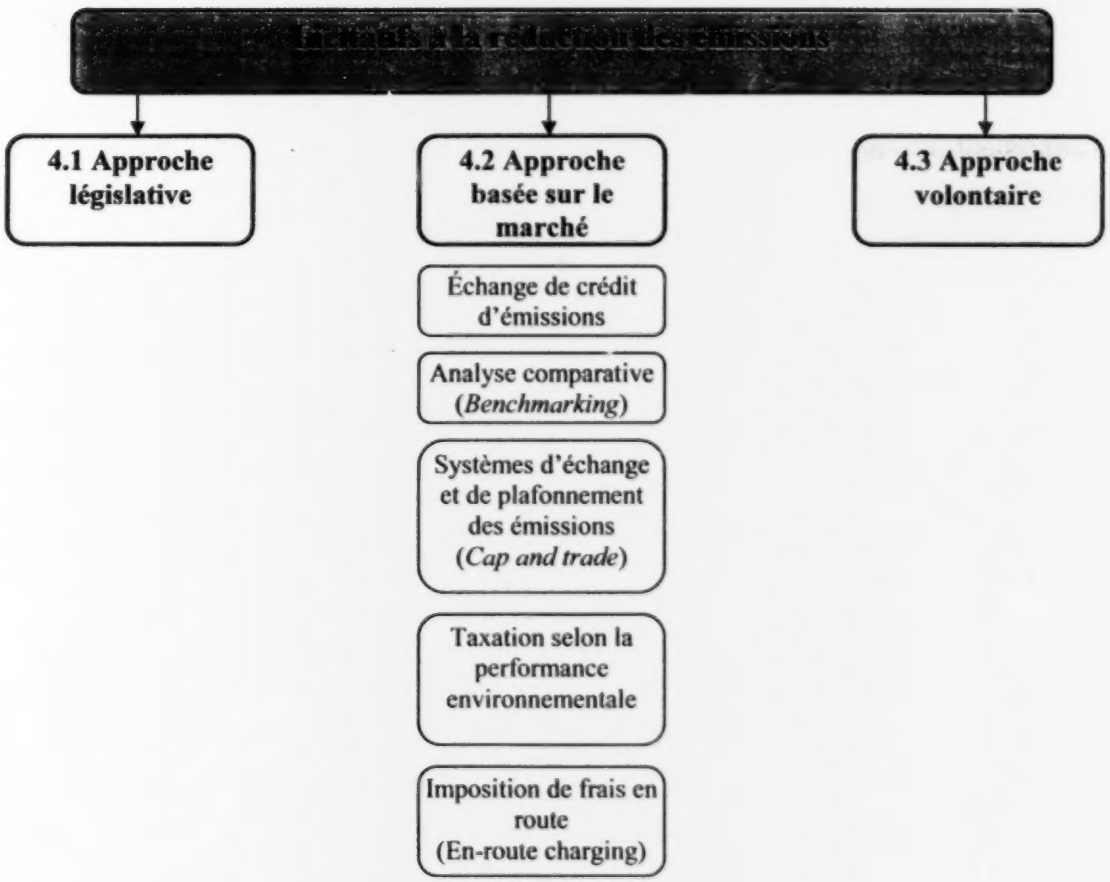
**Figure 2 : Catégorie d'incitatifs à la réduction des émissions**



## 4. Incitatifs à la réduction des émissions polluantes

En plus des méthodes de réduction des émissions polluantes, la revue de la littérature révèle d'autre part l'importance de la mise en place d'incitatifs afin d'encourager l'amélioration de la performance environnementale de la flotte des navires par rapport à la pollution atmosphérique. Tel que démontré par la figure 2, ces incitatifs se divisent en trois sous-groupes soit les approches législatives, les approches basées sur le marché ou les approches volontaires. La littérature aborde principalement l'évaluation de ces différents incitatifs afin de les instaurer en vue d'une réduction des émissions des navires.

**Figure 2 : Catégorie d'incitatifs à la réduction des émissions**



Les documents consultés dans le cadre de la revue de la littérature soulignent l'importance de mettre en place certains mécanismes incitatifs à la réduction des émissions puisque, comparativement aux autres modes, la pollution atmosphérique émise par la flotte de navires est appelée à augmenter. Ceci s'explique par le fait que les sources terrestres d'émissions sont appelées à diminuer leurs émissions à cause de l'adoption de nouvelles législations (Nera, 2004). La réduction des émissions des navires ne signifie cependant pas nécessairement une baisse absolue des émissions pour un pays. En effet, une réduction des émissions des navires qui engendrerait une hausse des coûts de transport pourrait favoriser un changement modal de la part des expéditeurs. Ce changement modal pourrait nuire à la baisse des émissions parce que les autres moyens de transport émettraient davantage de polluants (Nera, 2004).

Les particularités de l'industrie maritime rendent difficile l'adoption de mesures visant la réduction des émissions atmosphériques (Bode *et al.*, 2002). Les contraintes de l'industrie maritime et l'inexpérience de ce secteur à mettre en place des mesures incitatives à la réduction des émissions font en sorte qu'il serait préférable d'adopter des mesures par étape. De plus, il y a un équilibre a trouvé entre les bénéfices environnementaux et les coûts en terme de problèmes politiques, légaux et administratifs (Nera, 2004). En instaurant des mesures de manière successive, il serait possible de mettre d'abord des mesures plus générales qui sont moins complexes aux plans politiques et administratifs, mais qui ont aussi de moins grands bénéfices environnementaux. Une fois ces mesures bien implantées, il serait possible de passer graduellement à des mesures plus contraignantes. Selon les auteurs, les approches à privilégier divergent. Bode *et al.* (2002) ajoute que les mesures réglementaires instaurent des réductions minimales d'émissions par les différentes sources d'émissions. Quant à elles, les mesures basées sur le marché, qui utilisent l'économie plutôt que la loi pour inciter les diminutions d'émissions, engendrent des pressions supplémentaires afin d'améliorer davantage la performance des navires.

## 4.1 Approche législative

L'adoption de normes pour réduire la pollution atmosphérique est la méthode de contrôle des émissions la plus répandue (Bode *et al.*, 2002). La législation pourrait se faire à plusieurs niveaux que ce soit international par l'OMI, national, transnational ou local. Puisque l'industrie maritime est au coeur des processus économiques globaux, il semble que la manière la plus aisée de légiférer la réduction des émissions atmosphériques soit par l'entremise de l'Organisation Maritime Internationale (Commission of the European Communities, 2002). Par exemple, lors de la rédaction du protocole de Kyoto, le seul énoncé concernant la navigation affirme que:

> *The parties included in Annex 1 shall pursue the limitation or reduction of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol from aviation and marine bunker fuels, working through the IACO and the IMO, respectively.* (Marintek *et al*, 2000)

Les standards sur les émissions possèdent l'avantage de pouvoir être adoptés à plusieurs niveaux. Ainsi, les différents paliers de gouvernements et les organismes internationaux peuvent réglementer les émissions. *International shipping has gained substantial experience in finding international solutions to common safety and pollution problems in the form of conventions based on global uniform minimum standards* (Bode *et al.*, 2002). La législation, comme mesure pour diminuer les émissions atmosphériques, comporte cependant certains inconvénients. Certaines normes pourraient contrevenir à des traités internationaux, par exemple, l'adoption d'une réglementation régionale irait à l'encontre du droit de passage innocent protégé par la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (BMT, 2005). Les normes, basées sur la technologie existante au moment de leur adoption, ne peuvent s'adapter automatiquement à mesure que de nouvelles technologies font leur apparition. De plus, les normes s'appliquent indifféremment à toutes les sources d'émissions sans distinguer les écarts du coût des technologies pour ces sources. À cause du manque de flexibilité des mesures réglementaires, Bode *et al.* (2002) recommande de privilégier des mesures axées sur le marché afin de diminuer les émissions atmosphériques des navires. Cependant, selon le polluant, la législation peut s'avérer un bon moyen de réduire les émissions. Ainsi:

> *Regional regulations of foreign flagged vessels is not feasible for NOx, as it would require the imposition of CDEM (construction, design, equipment,*

> *and manning) rules and standards higher than generally accepted international rules and standards (GAIRAS). [...] On the other hand, regulations are a feasible option to control SOx emissions from international shipping. Implementing a SOxECA pursuant to IMO would be the preferred option, as it would be recognized as a GAIRAS and likely have higher uptake rates than alternatives options.* (BMT, 2005)

Actuellement, l'unique législation internationale qui régit les émissions atmosphériques des navires est l'annexe VI de la Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires connue sous le nom de MARPOL 73/78. Cette convention est entrée en vigueur depuis le 19 mai 2005 grâce à la signature de 19 pays représentant 59,9% du tonnage brut. Les signataires se sont engagés à respecter un ensemble de mesures qui concernent de nombreux gaz ; notamment, plafonner la teneur en soufre du carburant, limiter les émissions des $NO_x$ et interdire l'émission de gaz qui appauvrissent la couche d'ozone. Les efforts consentis pour répondre aux exigences de l'annexe VI datent d'avant son entrée en vigueur, en effet :

> *14% of the total installed engine power in 2001 is already produced by $NO_x$-optimized engines which comply with the IMO regulation (with a slight penalty in fuel consumption and, therefore, $CO_2$), whereas in 1995 the rate of $NO_x$ optimized engines in the fleet was zero. This leads only to a slight increase in $NO_x$ emissions between 1995 and 2001* (Eyring *et al.*, 2005).

Pour certains observateurs (Marintek *et al.*, 2000, BMT, 2005), ce traité représente un avancement, mais n'exige pas un effort suffisant des compagnies maritimes. Une lacune importante de l'annexe VI de la Convention de MARPOL de l'OMI provient du fait que le processus pour arriver à une entente négociée entre les partenaires prend beaucoup de temps. Cette lenteur explique l'intérêt de s'intéresser aux alternatives de législations nationales ou régionales (Marintek *et al.*, 2000). De plus, comme MARPOL ne peut forcer l'application des normes qu'il propose (Bode *et al.*, 2002), l'annexe VI ne pourra engendrer les réductions attendues de $NO_x$ et de $SO_2$ (Kågeson, 1999). Pourtant, il y a une pression à l'effet que l'industrie maritime diminue les polluants émis. En effet, le transport routier ou les usines, c'est-à-dire les sources terrestres d'émissions, ont déjà entrepris des actions pour diminuer leurs émissions. Puisque les sources terrestres ont déjà fait des démarches, le coût inhérent à la réduction d'une tonne d'un polluant coûterait désormais moins cher à l'industrie maritime qu'aux sources terrestres d'émissions qui ont déjà entrepris des actions (Kågeson, 1999). Finalement, les

règlements imposés par l'OMI sont jugés insuffisamment stricts ce qui minimise le besoin de réduire véritablement les émissions pour atteindre ces réglementations. Par exemple, la limite de 4,5% de teneur en soufre dans le carburant marin est déjà supérieure à la moyenne de 2,7% dans le monde (Fournier, 2006). De même puisque les limites imposées sur les émissions de $NO_x$ ne s'appliquent qu'aux navires construits ou fortement modifiés après 2000, il faudra du temps avant que les bénéfices d'un tel règlement se fassent sentir (Fournier, 2006).

En plus des règles des traités internationaux, il existe aussi des ententes régionales traitant des émissions atmosphériques. Les zones de contrôle des émissions de $SO_x$ (*Sulphur Emissions Control Areas, SECA*) sont des ententes concluent afin de réduire de façon marquée les émissions de $SO_x$ des navires pour une région déterminée. La raison d'être de ces ententes est de protéger adéquatement des écosystèmes sensibles. Une telle entente, intégrée à l'annexe VI, a été conclue pour la mer Baltique et doit entrer en vigueur en mai 2006 (Eyring *et al.*, 2005b). Des ententes similaires pour la mer Noire et la Manche seront aussi mises en vigueur dans le courant des prochaines années.

### 4.2 Approche basée sur le marché

Les approches basées sur le marché sont des incitatifs économiques qui permettent plus de flexibilité aux transporteurs afin de réduire leurs émissions de la manière qui leur convient le mieux. Ces approches basées sur le marché sont en effet moins restrictives que des approches législatives qui imposent l'adoption de certaines technologies, réglementent la qualité du carburant ou limitent directement la quantité d'émissions permise (Nera, 2004). De plus, les approches basées sur le marché permettent de contourner les clauses grands-pères, clauses protégeant les droits acquis, que les législations instaurent (Bode *et al.*, 2002).

Les mesures basées sur le marché se subdivisent en deux, soit les systèmes d'échange de crédits d'émissions et l'imposition de coûts supplémentaires. La catégorie des systèmes d'échange de crédits d'émissions se subdivise en trois : l'échange de crédits d'émissions conventionnel ainsi que deux variantes soit l'analyse comparative (*benchmarking*) et le système d'échange et de plafonnement des émissions (*cap and*

*trade*). La catégorie de l'imposition de coûts se subdivise, quant à elle, en deux soit la taxation selon la performance environnementale et l'imposition de frais en route. L'imposition de coûts, que ce soit des taxes ou des frais supplémentaires, nécessite la mise en place d'un système d'indexation des navires en fonction de leur performance environnementale qui créerait une hiérarchie des sources d'émissions (Bode *et al.*, 2002).

### *4.2.1 Échange de crédits d'émissions*

L'échange de crédits d'émissions est une approche volontaire de la part des transporteurs où chaque navire se voit attribuer un niveau d'émission en fonction de ses propres émissions lors de ses activités courantes. Lorsque le navire diminue ses émissions en dessous du niveau attribué, le transporteur peut vendre les émissions non utilisées. Le transporteur peut vendre ces émissions à des sources terrestres de pollution atmosphérique dans le cadre d'un marché d'émissions ou alors au gouvernement qui achèterait les crédits d'émissions dans le cadre de subventions à la qualité de l'air. Des variantes s'appliquent à cette approche de réduction des émissions. Le gouvernement peut ainsi imposer des quantités minimales de réduction d'émissions avant de permettre la vente de crédits. Cette réduction assure que les émissions diminuent en terme absolu et ne sont pas uniquement échangées entre sources de pollution. De plus, des différentiations géographiques par rapport à la valeur des émissions peuvent être introduites dans le système d'échange de crédits d'émissions de manière à protéger les milieux sensibles. Ainsi, une tonne de polluants économisés dans un milieu peu sensible vaudrait moins qu'une tonne lorsqu'échangée à une source d'émissions localisée dans un milieu sensible. Contrairement à d'autres approches, un système volontaire d'échange de crédits d'émissions ne permet pas de fixer un niveau d'émission maximal.

### *4.2.2 Analyse comparative (Benchmarking)*

L'analyse comparative est une mesure obligatoire qui vise tout un secteur d'activité pour lequel est fixé un taux moyen d'émission. Les compagnies qui arrivent à diminuer leur pollution sous le taux moyen d'émission peuvent alors vendre les émissions non produites à d'autres compagnies afin que la moyenne du taux d'émission pour

l'ensemble du secteur d'activité corresponde au taux défini. *Like credit programmes, benchmarking programmes provide flexibility by allowing sources that can reduce emissions cheaply to trade with sources that would require expensive measures to reduce emissions* (Nera, 2004). Tel qu'exposé dans le rapport de Nera (2004), l'analyse comparative peut se réaliser de plusieurs manières. L'analyse comparative peut être valable obligatoirement pour une catégorie de navires. La deuxième alternative est sur une base volontaire pour un ensemble de compagnies qui souhaitent collectivement respecter les normes en vigueur grâce à l'analyse comparative qui permet aux navires qui dépassent les normes d'acheter de compagnies qui sont sous les normes des émissions. La dernière alternative proposée dans le rapport de Nera (2004) permet aux compagnies qui participent au *benchmarking* d'engranger les émissions qu'ils économisent en polluant moins que le taux permis afin de les émettre lors d'années futures alors que la limite de pollution sera plus stricte. Une limite de l'analyse comparative est qu'elle propose de limiter les taux d'émission des navires. Conséquemment, ce système ne permet pas assurément de réduire en données absolues les émissions produites.

*4.2.3 Système d'échange et de plafonnement des émissions (Cap and trade)*

Le système de plafonnement et d'échange des émissions attribue une quantité maximale d'émissions pour l'ensemble de l'industrie maritime. Au moment de l'instauration de ce système, chaque navire se voit attribuer une valeur maximale d'émission en fonction de ses émissions. Les navires pouvant diminuer leurs émissions en dessous de la limite permise peuvent les vendre à d'autres navires qui n'arriveraient pas à atteindre leur limite. Des nuances peuvent être apportées à ce système de réduction des émissions ; des valeurs différentes peuvent être accordées selon le lieu où sont émises les émissions. Les émissions produites en mer pourraient ainsi valoir moins lorsqu'échangés contre des émissions produites près des côtes.

Le plafonnement et l'échange d'émissions présentent l'avantage de limiter la quantité absolue d'émissions relâchée dans l'atmosphère et donc de connaître à l'avance les bénéfices environnementaux du système de réduction adopté. *According to Norway it would be a demanding task to achieve an agreement on the size of a cap on total emissions from shipping (IMO 2001a, p.4) but on the other hand one has to recall the*

*international climate negociations that where very demanding, too, but nevertheless successful* (Bode *et al.*, 2002).

*4.2.4 Taxation selon la performance environnementale*

Introduire une taxe ou des frais selon la performance environnementale des navires est un autre incitatif pour diminuer la pollution atmosphérique. Plusieurs modèles de taxation pourraient s'appliquer à la pollution atmosphérique des navires. La taxe pourrait viser la qualité du carburant consommé selon la distance parcourue par le navire ou alors la qualité de carburant selon la quantité de carburant acheté aux différents points de vente. Un autre modèle de taxation serait l'imposition de frais en fonction des émissions produites. L'introduction de frais pourrait se faire par l'imposition de coûts d'utilisation des infrastructures portuaires ou des corridors maritimes selon les émissions des navires.

Les taxes ne limitent pas directement la pollution atmosphérique, mais contribuent à la diminuer en imposant un coût sur les émissions (Bode *et al.*, 2002). Une taxe sur l'utilisation ou la vente de carburant cible principalement les polluants dont les émissions sont directement liées à la combustion du carburant. L'efficacité de cette taxe dépend de plusieurs facteurs : *individuals ship types, the value of the cargo and the availability of alternative transport modes* (Bode *et al.*, 2002). Une telle taxe peut, quant à elle, cibler tous les polluants et présente aussi l'avantage de pouvoir s'ajuster selon la sensibilité du milieu qu'elle protège. Dans le cas d'une taxe sur la vente de carburant, la taxe ne sera efficace que si tous les points de vente l'appliquent. Par exemple, au début des années 1990, la Californie a imposé une taxe sur le carburant qui a été introduite pour améliorer la qualité de l'air puis retirée à cause de l'affaissement du marché de la vente du carburant dans cette région (Michaelis, 1997). L'exemple de la Californie démontre que la taxation de la vente de carburant comporte certaines limites. Il est en effet préférable que cette mesure soit adoptée partout et non pas seulement dans un nombre restreint de ports, sans quoi les opérateurs de navires choisissent de ne pas s'approvisionner en carburant dans les ports qui imposent une telle taxe. Michaelis (1997) ajoute qu'une taxe sur le carburant pourrait engendrer un transfert modal en faveur de la route ce qui contribuerait à dégrader la qualité de l'air.

L'imposition de coûts d'utilisation des infrastructures portuaires ou des corridors maritimes selon les émissions des navires présente aussi un inconvénient. Nera (2004) suggère en effet que les administrations portuaires ne réussiraient pas à différentier les charges environnementales par rapport aux autres frais et que cela nuirait aux bénéfices environnementaux qu'il serait possible de retirer.

*4.2.5 Imposition de frais en route (En-route charging)*

L'imposition de frais en route est une taxe imposée aux navires selon leur utilisation des eaux territoriales en fonction du temps, de la distance ou du nombre de trajets. Selon Nera (2004), cette taxe se distingue de la taxe à la performance environnementale axée sur les émissions atmosphériques. L'imposition de frais en route serait évaluée en fonction de taux d'émission calculés tandis que la taxe à la performance environnementale serait facturée selon les émissions mesurées. À l'instar de la taxe sur la vente de carburant, cette imposition doit se réaliser sur un grand territoire de manière à éviter que les transporteurs ne choisissent de contourner les zones touchées (BMT, 2005).

4.3 Approche volontaire

Des ententes entre une/des compagnies ou une industrie et le gouvernement représentent un autre incitatif afin de réduire les émissions atmosphériques. Parfois sous la menace implicite de l'imposition de règlements, les ententes volontaires peuvent varier d'une déclaration de principes jusqu'à des contrats incluant des pénalités lorsqu'ils ne sont pas respectés (Marintek *et al.*, 2000).

Les ententes volontaires peuvent porter sur un ensemble de sujets comme les taux d'émission, la quantité d'émissions, les technologies à adopter, les pratiques opérationnelles à privilégier. Le caractère morcelé des ententes volontaires, en ce sens que les ententes volontaires se font entre quelques particuliers, représente cependant un inconvénient puisque ces dernières ne peuvent induire de changements importants dans l'industrie maritime qui est intégrée à l'échelle internationale (Bode *et al.*, 2002). Même si l'OMI voulait instaurer des ententes volontaires pour l'ensemble de l'industrie maritime, le fait que cet organisme n'ait pas autorité sur les compagnies maritimes et n'ait pas la possibilité d'imposer des mesures plus strictes réduit les probabilités qu'une

grande proportion de compagnies s'investissent dans les ententes volontaires (Bode *et al.*, 2002). De plus, ces accords ne changent rien aux navires polluants et peuvent nuire à la compétitivité des navires qui s'engagent à améliorer leur performance en terme d'émissions (Bode *et al.*, 2002).

## 5. Coût de la pollution

La question des coûts associés aux émissions atmosphériques est une préoccupation des autorités gouvernementales qui souhaitent faire des choix politiques éclairés sur l'enjeu de la réglementation des sources d'émissions. Bien que le thème des coûts externes des transports soit assez étudié dans la littérature scientifique, il n'existe cependant qu'un nombre restreint d'études portant sur les coûts de la pollution atmosphérique émise par les navires (Bickel *et al.*, 2002 ; Gallagher, 2005 ; INFRAS/IWW, 2004).

Il n'existe actuellement pas de consensus sur le véritable coût de cette pollution atmosphérique. Les quelques études qui se sont penchées sur les coûts de la pollution atmosphérique des navires varient quant à leurs résultats. La comparaison entre ces études est d'autant plus difficile que les régions géographiques évaluées divergent. Certains problèmes d'incertitude persistent dans la recherche du coût de cette pollution. Il y a d'abord le problème relié à l'inventaire des émissions, tel que déjà mentionné, qui empêche de connaître avec certitude le coût total de cette pollution. Il y a aussi la difficulté d'attribuer un montant aux effets externes des émissions, notamment parce qu'il est ardu de donner une valeur monétaire aux composantes environnementales. La revue de la littérature permet d'identifier trois études qui traitent des coûts associés aux émissions atmosphériques produites par le transport de marchandises.

### 5.1 INFRAS/IWW

INFRAS/IWW a réalisé une étude sur les coûts externes des transports en Europe, pour les pays de l'Europe des 15 en plus de la Suisse et la Norvège (INFRAS/IWW, 2004). Leurs résultats indiquent que la pollution atmosphérique représente 27% des coûts externes associés aux transports tandis que le changement climatique engendré équivaut à 30%. Le reste des coûts se divisent entre plusieurs éléments, dont les

accidents et le bruit. Les coûts externes évalués dans cette étude excluent la congestion qui est traitée séparément. Les résultats indiquent aussi que 33% des coûts sont occasionnés par le transport de marchandises comparativement à 66% pour le transport de passagers. Les auteurs mentionnent que la voie navigable a peu d'impact sur les coûts externes des transports soit 0,4% du total. Pour ce qui a trait à la pollution atmosphérique, la voie navigable engendrerait des coûts moyens de 16,82 $US[6] par 1000 tonnes pour un kilomètre, ce qui équivaut au coût le plus faible après le rail. Finalement, le coût moyen par rapport au scénario élevé de changement climatique pour transporter 1000 tonnes de marchandises sur un kilomètre égale 5,13 $US, ce qui est encore le coût le plus faible derrière le rail et bien devant le transport routier qui est quatre fois plus dispendieux.

5.2 Bickel *et al.*

Dans leur travail en 2002, Bickel *et al.* ont estimé les coûts de la pollution atmosphérique des navires en Europe. La valeur des coûts est calculée pour l'année 1998 tandis que la valeur des émissions l'est à partir des données de 1990. Le total du coût de la pollution de l'air et du réchauffement climatique est de 18 636 M$US[7] ; ce chiffre incluant les émissions de l'océan Atlantique, la mer Baltique, la mer Noire, la Manche, la mer du Nord ainsi que la mer Méditerranée. Les auteurs insistent sur l'incertitude reliée à leur démarche. En effet, plusieurs facteurs, et ce, à toutes les étapes de leurs calculs, sont sources d'erreur pour leurs résultats. De même, plusieurs impacts de la pollution atmosphérique des navires ne sont pas pris en compte dans cette évaluation monétaire puisqu'aucune donnée ne permet de les quantifier ; par exemple :

> changement dans la biodiversité, effets potentiels dus à l'exposition chronique à l'ozone pour les monuments culturels, effets économiques directs et indirects par des changements sur la productivité de la forêt, et plus encore (Traduction libre de Bickel *et al.*, 2002, p.15).

[6] Conversion d'euro en dollars US le 13 mars 2006.
[7] Conversion d'euro en dollars US le 13 mars 2006.

### 5.3 Gallagher

Gallagher s'est intéressé aux coûts inhérents aux émissions des navires (Gallagher, 2005). Au lieu de quantifier combien coûte à la société une quantité x de polluants, il a plutôt calculé, à partir de données existantes, le prix associé à la réduction d'une tonne de polluant *x* par les navires. Pour le $SO_2$, le calcul se base sur le prix inhérent à la mise en place des mesures pour réduire les émissions des navires en Europe. Bien qu'utilisant les données européennes, Gallagher insiste sur le fait que les données américaines sont similaires. Pour le $NO_x$, le prix correspond à la valeur sur les différents marchés de permis des émissions aux États-Unis. À partir de ces coûts, Gallagher a évalué que le coût moyen des émissions de $SO_2$ pour les États-Unis entre 1993 et 2001 se situe entre 77 et 435 M$ US par année. Il a fait le même exercice pour les émissions de $NO_x$ et conclut que le coût annuel moyen pour la même période était de 412 M$ US.

## Conclusion

La navigation représente un mode de transport bénéfique au niveau environnemental. En ce sens, il serait positif de transférer certains déplacements de marchandises du transport routier vers le mode maritime afin de réduire la consommation de carburant ainsi que diminuer substantiellement la quantité de gaz à effet de serre produit. Malgré cette avance environnementale, le transport maritime se doit de prendre un virage encore plus vert en développant de nouvelles technologies et réglementations qui répondent à cette demande. Les efforts en ce sens sont, selon nous, déjà bien entamés avec toutes les recherches qui sont menées et qui travaillent à mieux cerner les émissions des navires et à trouver des solutions pour les réduire. Il s'agit désormais d'approfondir nos connaissances, d'encourager les initiatives et d'apprendre des exemples internationaux.

## Bibliographie


AIR POLLUTION PREVENTION DIRECTORATE. (2005) «Marine Emission Inventories» *Charting the Course: Marine Fuel Efficiency and Emissions Conference.* 25 diapos. Site internet consulté le 2 mars 2006.
http://www.tc.gc.ca/programs/environment/Freight/training/marine/pdf/Scott%20and%20Josée.pdf

ARMATEURS DU SAINT-LAURENT. (2005) *Idées en marche pour l'industrie du transport des marchandises.* Transport Canada. 19 diapos. Site internet consulté le 21 février 2006.
http://www.armateurs-du-st-laurent.org/documents/BRivardASLjuin05.pdf

ARMATEURS DU SAINT-LAURENT. (2005) *Réduire la pollution de l'air émise par les navires.* Environnement Canada. 38 diapos. Site internet consulté le 21 février 2006.
http://www.armateurs-du-st-laurent.org/documents/JMailletteASLjuin05.pdf

BAILEY, Diane et SOLOMON, G. (2004) «Pollution prevention at ports : clearing the air». *Environmental Impact Assessment Review.* Vol.24, No.7-8, pp.749-774.

BEIRLE, S. *et al.* (2004) «Estimate of nitrogen oxide emissions from shipping by satellite remote sensing». *Geophysical Research Letters.* Vol.31, No.L18102, 4 p.

BICKEL, Peter. (2002) «Costs due to air pollution from maritime shipping». Competitive and Sustainable Growth Programme. 20 p. Site internet consulté le 21 février 2006.
http://www.its.leeds.ac.uk/projects/unite/downloads/D14_Annex2.doc

BLUE WATER NETWORK *et al.* (2004) «Shoreside Power for Marine vessels Environmental Perspective». 10 diapos. Site internet consulté le 20 juillet 2006.
http://www.arb.ca.gov/msprog/offroad/marinevess/presentations/110904/shore.pdf

BODE, S. *et al.* (2002) *Climate Policy : Analysis of ecological, technical and economic implications for international maritime transport.* 30 p. Site internet consulté le 25 juin 2006.
http://www.hwwa.de/Forschung/Klimapolitik/docs/Archiv/Bode_Krause_Michaelowa_2002.pdf

BMT. (2000) *Study on the economic, legal, environmental and practical implications of a European Union system to reduce ship emissions of $SO_2$ and $NO_X$.* APPENDIX 1: Levels and Characteristics of Shipping Traffic Marine Fuel Use and Resulting Atmospheric Emissions in European Water. P. 25. Site internet consulté le 21 février 2006.
http://europa.eu.int/comm/environment/enveco/taxation/ship_emissions/app1final.pdf

BMT. (2000) *Study on the economic, legal, environmental and practical implications of a European Union system to reduce ship emissions of $SO_2$ and $NO_X$.* *APPENDIX 2: Atmospheric Emissions & Air Quality. 28 p. Site internet consulté le 21 février 2006.
http://europa.eu.int/comm/environment/enveco/taxation/ship_emissions/app2final.pdf

BMT. (2000) *Study on the economic, legal, environmental and practical implications of a European Union system to reduce ship emissions of $SO_2$ and $NO_X$.* APPENDIX 3: Existing Environmental Differentiation Schemes. 28 p. Site internet consulté le 21 février 2006. http://europa.eu.int/comm/environment/enveco/taxation/ship_emissions/app3final.pdf

BMT. (2000) *Study on the economic, legal, environmental and practical implications of a European Union system to reduce ship emissions of $SO_2$ and $NO_X$.* APPENDIX 4: Legal Analysis: Prescription, Enforcement and Observance. 135 p. Site internet consulté le 21 février 2006.
http://europa.eu.int/comm/environment/enveco/taxation/ship_emissions/app4final.pdf

BMT. (2000) *Study on the economic, legal, environmental and practical implications of a European Union system to reduce ship emissions of $SO_2$ and $NO_X$.* APPENDIX 5: Marine Fuels & Ship Emission Controls. 17 p. Site internet consulté le 21 février 2006.
http://europa.eu.int/comm/environment/enveco/taxation/ship_emissions/app5final.pdf

BMT. (2000) *Study on the economic, legal, environmental and practical implications of a European Union system to reduce ship emissions of $SO_2$ and $NO_X$.* APPENDIX 6: Environmental Assessment of Policy Options. 23 p. Site internet consulté le 21 février 2006.
http://europa.eu.int/comm/environment/enveco/taxation/ship_emissions/app6final.pdf

BMT. (2000) *Study on the economic, legal, environmental and practical implications of a European Union system to reduce ship emissions of $SO_2$ and $NO_X$.* APPENDIX 7: Economic Analysis of Policy Options. 34 p. Site internet consulté le 21 février 2006.
http://europa.eu.int/comm/environment/enveco/taxation/ship_emissions/app7final.pdf

BP MARINE. (2005) *Marpol Annex VI: Is there a future for marine fuels?* The Sustainable Shipping Forum. 10 diapos. Site internet consulté le 21 février 2006.
http://www.seaat.org/media/lib/BP%20Green%20Shipping.ppt

CANADA'S MARINE INDUSTRY ALLIANCE. (2005) *Canada's Marine Industry Alliance: A Blueprint for a stronger future.* 56 p. Site internet consulté le 21 février 2006.
http://www.cmc-ccm.com/Adobe%20Acrobate/MarineBlueprint-E.pdf

CANADIAN PETROLEUM PRODUCTS INSTITUTE. (2005) *Marine Transport and air quality.* 22 diapos. Site internet consulté le 2 mars 2006.
http://www.tc.gc.ca/programs/environment/Freight/training/marine/pdf/GerJohnpres05.pdf

CAPALDO, Kevin *et al.* (1999) «Effects of ship emissions on sulphur cycling and radiative climate forcing over the ocean». *Nature.* Vol.400, No.6746, pp.743-746.

CONVENTION-CADRE DES NATIONS UNIS SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES. CCNUCC. (2006) *Introduction au processus des changements climatiques.* Site internet consulté le 1 juillet 2006.
http://unfccc.int/portal_francophone/essential_background/feeling_the_heat/items/3255.php

CHEMINFO. (2000) *Cost-Benefit study of marine engine $No_x$ emissions control systems.* Transportation Development center of Transport Canada. Site internet consulté le 21 février 2006. http://www.tc.gc.ca/tdc/publication/pdf/14300/14373e.pdf

CHRISTIANSEN *et al.* (2004) *Ship Routing and Scheduling: Status and perspectives.* Transportation Science. Vol. 38, No. 1 Site internet consulté le 20 juillet 2006. http://www.atypon-link.com/INF/doi/pdf/10.1287/trsc.1030.0036?cookieSet=1

CHEN *et al.* (2005) « An investigation of the chemistry of ship emission plumes during ITCT 2002». *Journal of Geography Research*, Vol. 110, No.D10S90, 15 p.

COLVILE, R.N. *et al.* (2001) «The transport sector as a source of air pollution». *Atmospheric Environment.* Vol.35, No.9, pp.1537-1565.

COMMISSION of the European Communities. (2002) «A European Union strategy to reduce atmospheric emissions from seagoing ships». *Communication from the Commission to the European Parliament and the Council.* 23 p. Site internet consulté le 21 février 2006.
http://www.cie.gov.pl/HLP/files.nsf/0/BF29524C14992B49C1256F47004163DD/$file/20020595.pdf

COMTOIS C. et SLACK, B. (2005) *Transformations de l'industrie maritime : Portrait international de développement durable appliqué.* 247p. Site internet consulté le 9 août 2006. http://www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/publications/ministere/recherche/etudes/rtq0503.pdf

COOPER, D.A. (2003) «Exhaust emissions from ships at berth». *Atmospheric Environment.* Vol.37, No.27, pp.3817-3830.

COOPER, D.A. (2005) «HCB, PCB, PCDD, and PCDF emissions from ships». *Atmospheric Environment.* Vol.39, No.27, pp.4901-4912.

COOPER, D.A. et EKSTRO, M. (2005) «Applicability of the PEMStechnique for simplified $NO_X$ monitoring on board ships». *Atmospheric Environment.* Vol.39, No.1, pp.127–137.

CORBETT, James J. et FISCHBECK, Paul. (1997) «Emissions from ships». *Science.* Vol.278, No.5339, pp.823-824.

CORBETT, James J. (1999) «Global nitrogen and sulfur emissions inventories for oceangoing ships». *Journalof Geophysical Research.* Vol.104, pp.3457-3470.

CORBETT, James J. (2003) «New Directions: Designing ship emissions and impacts research to inform both science and policy». *Atmospheric Environment.* Vol.37, No.33, pp.4719-4721.

CORBETT, James J. et KOEHLER, Horst W. (2003) «Updated emissions from ocean shipping». *Journal of Geography research*, Vol. 108, No.D20, 16 p.

CORBETT, James J. et KOEHLER, Horst W. (2004) «Considering alternative input parameters in an activity-based ship fuel consumption and emissions model: Reply to comment by Øyvind Enderson *et al.* on Updated emissions from ocean shipping» *Journal of Geography research*, Vol. 109, No.D23303, 8 p.

CORBETT, James J. (2003) «Vessel operator engine emissions measurement guide». *United States Maritime Administration*. 45 p. Site internet consulté le 21 juillet 2006. http://www.marad.dot.gov/nmrec/energy_technologies/images/Final%20Report%207.pdf

DAVIS, D.D. *et al.* (2001) «Impact of Ship Emissions on Marine Boundary Layer $NO_x$ and $SO_2$ Distributions over the Pacific Basin». *Geophysical Research Letters*. Vol.28, No.2, pp.235-238.

EEB. (2002) *EEB Clean Air Seminar.* 68 p. Site internet consulté le 21 février 2006. http://www.eeb.org/activities/air/Report-of-EEB-CleanAir-seminar-June-2002.pdf

EEB *et al.* (2004) *Air pollution from ships.* 15 p. Site internet consulté le 21 février 2006. http://www.eeb.org/activities/air/ship-briefing-nov04-(1).pdf

ENDRESEN, Øyvind *et al.* (2003) «Emissions from international sea transportation and environmental impact». Journal of Geophysical Research. Vol.108, No.D17, p. 22

ENDRESEN, Øyvind *et al.* (2005) «Improved modelling of ship $SO_2$ emissions- a fuel-based approach». *Atmospheric Environment.* Vol.39, No.20, pp.3621-3628.

ENTEC UK Limited. (2005) *Service contract on ship emissions: Assignment, abatement and market-based instruments* European Commission directorate general environment. Site internet consulté le 21 février 2006.
*(Task 1: Preliminary Assignment of Ship Emissions to European Countries).* 100 p.
http://europa.eu.int/comm/environment/air/pdf/task1_asign_report.pdf
*(Task 2a: Shore-Side Electricity).* 42 p.
http://europa.eu.int/comm/environment/air/pdf/task2_shoreside.pdf
*(Task 2b: $NO_x$ Abatement).* 44 p.
http://europa.eu.int/comm/environment/air/pdf/task2_nox.pdf
*(Task 2c: $SO_x$ Abatement).* 28 p.
http://europa.eu.int/comm/environment/air/pdf/task2_so2.pdf

ENVIRON INTERNATIONAL CORPORATION *et al.* (2005) *Shoreside Power Feasibility study for cruise ships Berthed at Port of San Francisco.* 86 p. Site internet consulté le 20 juillet 2006.
http://www.sfport.com/site/uploadedfiles/sfport/maritime_act/ENVIRON_Final_Report_091305_main%20body_Rev.pdf

ENVIRONNEMENT CANADA (2005) *Les éléments nutritifs dans l'environnement canadien.* 79 p. Site internet consulté le 20 juillet 2006.
http://www.ec.gc.ca/soer-ree/Francais/SOER/nutrientsfre.pdf

EUROPEAN Commission Community Research. (2003) *External Costs: Research results on socio-environmental damages due to electricity and transport.* 15 p. Site internet consulté le 21 février 2006. http://www.externe.info/externpr.pdf

EYRING, V. *et al.* (2005a) «Emissions from international shipping: 1. The last 50 years». *Journal of geographical research.* Vol. 110, No.D17305, 12 p.

EYRING, V. *et al.* (2005b) «Emissions from international shipping: 2. Impact of future technologies on scenarios until 2050.» *Journal of geographical research.* Vol. 110, No.D17306, 18 p.

FLEETWAY. (2005) *$NO_x$ emission study: An investigation of Water-based Emission Control Technologies.* 76 p. Site internet consulté le 21 juillet 2006. http://www.tc.gc.ca/tdc/publication/pdf/14400/14497e.pdf

FOURNIER, Anthony. (2006) *Controlling Air Emissions from Marine Vessels: Problems and Opportunities.* 85 p. Site internet consulté le 9 août 2006. http://www-igcc.ucsd.edu/pdf/Marine_Emissions_(2-11-06).pdf

FRASER *et al.* (2004) *Reducing Air Emissions from Marine Diesel Engines: Regional Recommendations.* Site internet consulté le 21 juillet 2006. http://depts.washington.edu/poeweb/gradprograms/envmgt/2004symposium/marine-final.pdf

FRIENDS OF THE EARTH INTERNATIONAL. (2005) *Prevention of air pollution from ships.* IMO 24 p. Site internet consulté le 21 février 2006. http://www.acidrain.org/pages/policy/NGO_submission_MEPC_July05.pdf

FRIENDS OF THE EARTH INTERNATIONAL. (2006) *Review of Marpol Annex VI and the $NO_x$ Technical code.* IMO 6 p. Site internet consulté le 10 juillet 2006. http://www.imo.org/Environment/mainframe.asp?topic_id=233

GALLAGHER, Kevin P. (2005) «International trade and air pollution : Estimating the economic costs of air emissions from waterbone commerce vessels in the United States». *Journal of Environmental Management.* Vol.77, No.2, pp.99-103.

GALLAGHER, Kevin P. TAYLOR R. (2003) *International trade and air pollution : The economic cost of air emissions from waterborne commerce vessels in the United States.* Global development and Environment Institute: Working paper No. 03-08. 14 p. Site internet consulté le 21 février 2006. http://ase.tufts.edu/gdae/publications/working_papers/03-08WaterborneCommerce.PDF

GEORGAKAKI A. *et al.* (2005) «Transport and Environment Database System (TRENDS): Maritime air pollutant emission modelling». *Atmospheric Environment.* Vol.39, No.13, pp.2357–2365.

GOLDSWORTHY L. (2002) *Design of ship engines for reduced emissions of oxides of nitrogen*. Site internet consulté le 20 juillet 2006.
http://www.amc.edu.au/research/areas/marine.engines/shipNOx.pdf

GORDON E. (2005) *Reduction of NonRoad Diesel Emissions in the Lower Fraser Valley and the Rest of BC*. 161 pages. Site internet consulté le 20 juillet 2006.
http://www.gvrd.bc.ca/air/pdfs/NonRoadHDD.pdf

GORE D. (2002) *The maritime administration's energy and emission program*. 30 diapos. Site internet consulté le 20 juillet 2006.
http://www.osti.gov/fcvt/deer2002/gore.pdf

HANNA, Steven R. *et al.* (2004) «FLACS CFD air quality model performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass, and EMU observations». *Atmospheric environment*. Vol.38, No.28, pp.4675-4687.

HELSINKI COMMISSION (2005) *Information Paper on the Reduction of Emissions from Ships in Ports by using on-shore Power Supply*. 5 p. Site internet consulté le 20 juillet 2006.
http://sea.helcom.fi:15037/dps/docs/documents/Maritime%20Group/HELCOM%20MARITIME%204,%202005/6-2.pdf

HELSINKI COMMISSION (2004) *Emissions of the Ships in Baltic Sea Area*. 12 p. Site internet consulté le 20 juillet 2006.
http://sea.helcom.fi:15037/dps/docs/documents/Maritime%20Group/HELCOM%20MARITIME%203,%202004/6-1.pdf

HENSHER, D.A. ET K.J. BUTTON. (2003) *Handbook of Transport and the Environment*. Elsevier, Amsterdam. 827 p.

INFRAS/IWW. (2004) *Les coûts externes des transports: étude d'actualisation*. Document de synthèse. 18 p. Site internet consulté le 21 février 2006.
http://www.cer.be/files/INFRAS%20Summary_FR-121123A.pdf

INFRAS/IWW. (2004) *Les coûts externes des transports: étude d'actualisation*. Document de synthèse. 18 p. Site internet consulté le 21 février 2006.
http://www.cer.be/files/INFRAS%20Summary_FR-121123A.pdf

INNOVATION MARITIME. (2005) «Étude de faisabilité pour identifier des sites potentiels pour la mise en place de projets-pilote d'alimentation terrestre des navires». 12 diapos. Site internet consulté le 3 juillet 2006. http://www.tc.gc.ca/programmes/Environnement/fret/Formation_et_sensibilisation/marine/pdf/AnjL%20fr..pdf

INNOVATION MARITIME. (2006) *Les marées et la réduction de consommation de carburant des navires marchands*. 17 diapos. Site internet consulté le 3 juillet 2006.
http://www.geog.umontreal.ca/donnees/ACFAS_2006/Alain_richard.ppt#286,2

ISAKSON, J. *et al.* (2001) «Identification and assessment of ship emissions and their effects in the harbour of Göteberg, Sweden». *Atmospheric Environment.* Vol.25, No.21, pp.3659-3666.

KÅGESON, Per. (1999) «Economic instruments for reducing emissions from sea transport». *Air Pollution and Climate Series.* 32 p. Site internet consulté le 9 août 2006. http://www.acidrain.org/pages/publications/reports/shipping.pdf

KÅGESON, Per. (2001) «The impact of CO2 Emissions Trading on the European Transport Sector». Vinnova. 59 p. Site internet consulté le 4 juillet www.vinnova.se/upload/EPistorePDF/vr-01-17.pdf

KATSUMI, et al. (2005) *Charting the Course: Marine Fuel Efficiency and Emissions Conference.* 9 diapos. Site internet consulté le 10 août 2006, http://www.tc.gc.ca/programs/environment/Freight/training/marine/pdf/NaomiK.pdf

KÜNZLI, N. *et al.* (2000) «Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment». *The Lancet.* Vol.356, pp.795-801.

LIN, Bin et LIN, Cherng-Yuan. (2006) «Compliance with international emission regulations : Reducing the air pollution from merchant vessels». *Marine Policy.* Vol.30, No.3, pp.220-225.

LOVBLAD ET FRIDELL. (2006) *Experiences from use of some techniques to reduce emissions from ships* 32 p. Site internet consulté le 20 juillet 2006. http://www.profu.se/experiences.pdf

MARINTEK *et al.,* (2000) *Study of greenhouse gas emissions from ships.* IMO,176 p. Site internet consulté le 21 février 2006. http://unfccc.int/files/methods_and_science/emissions_from_intl_transport/application/pdf/imoghgmain.pdf

MARINTEK. (2001) *Environment on the Agenda.* Marintek Review, 8 p. Site internet consulté le 21 juillet 2006. http://www.sintef.no/content/page___3571.aspx

MARITERMAB. (2004) *Shore-side electricity for ships in ports: Case studies with estimates of internal and external costs, prepared for the North Sea Commission.* 28 p. Site internet consulté le 21 février 2006. http://www.mariterm.se/download/Shore-Side%20Electricity%20for%20Ships%20Report%20official.pdf

MARMER, E. et LANGMANN, B. (2005) «Impact of ship emissions on the Mediterranean summertime pollution and climate: A regional model study» *Atmospheric Environment.* Vol. 39, No.26, pp.4659-4669.

MARSHALL, D. (2005) *An NGO's perspective on international shipping.* Haagen_Smit Symposium. Clean air task force. 15 diapos. Site internet consulté le 21 février 2006. http://www.westcoastdiesel.org/files/clearinghouse-marine/Haagen-Smit%20Symposium%20Clean%20Air%20Task%20Force.pdf

MICHAELIS, Laurie. (1997) *Special issues in carbon/energy taxation : marine bunker fuel charges*. Annex 1 Expert Group on the UNFCCC Working Paper No.11. 45 p. Site internet consulté le 12 juillet 2006.
http://www.olis.oecd.org/olis/1997doc.nsf/LinkTo/ocde-gd(97)77

NERA. (2005) *Economic Instruments for Reducing Ship Emissions in the European Union*. 117 p. Site internet consulté le 21 février 2006.
http://europa.eu.int/comm/environment/air/pdf/task3_final.pdf

NERA Economic Consulting. (2004) «Evaluation of the Feasibility of Alternatives Market-Based Mechanismes To Promote Low-Emission Shipping In European Union Sea Areas». *For the European Commission, Directorate-General Environment*. 106 p. Site internet consulté le 21 février 2006.
http://europa.eu.int/comm/environment/air/pdf/04_nera_report.pdf

NORTH SEA COMMISSION. (2005) Background paper for discussion of air pollution from ships in harbours: Improved fuel quality, energy from onshore facilities, and other options. 8 p. Site internet consulté le 2 juin 2006.
http://www.regeringen.se/content/1/c6/06/29/47/a12ab747.pdf

OPTIMAR. (2004) *Optimization in Maritime Transportation and Logistics*. 11 p. Site internet consulté le 16 juillet 2006.
http://www.iot.ntnu.no/optimar/documents/project_description_OPTIMAR_rev.pdf

OROL, R. (2005) «La pollution de l'air par les navires: un sujet de préoccupation croissant». Le *bulletin de la commission de coopération environnementale de l'Amérique du Nord*. 6 p.

PANIS, L. Int. *et al.* (2003) «Air pollution impacts of inland shipping : two case studies». *Proceedings of the 9th Int. conf. Urban transport and the environment for the 21th century*. 10 p.

PAPPORS, N. et SKØLSVIK, K.O. (2002) «The European marine fuel market - present and future». *International Conference on Marine Science and Technology for Environmental Sustainability*. 7 p. Site internet consulté le 21 février 2006.
http://www.sintef.no/upload/MARINTEK/PDF-filer/Publications/The%20European%20marine%20fuel%20market_KOS.pdf

PETZOLD, A. *et al.* (2004) «Particle emissions from ship engines». *Abstract of the European Aerosol Conference*. pp.S1095-S1096.

PISANI, Christian. (2002) «Fair at Sea: The Design of a Future Legal Instrument on Marine Bunker Fuels Emissions within the Climate Change Regime». *Ocean Development & International Law*. Vol.33, No.1, pp.57-76.

PORT OF GÖTEBORG. (2006) *Shore-connected electricity supply to vessels in the port of Göteborg.* 4 p. Site internet consulté le 2 mars 2006. http://www.portgot.se/prod/hamnen/ghab/dalis2.nsf/vyFilArkiv/shoreconnectedelectricity.pdf/$file/shoreconnectedelectricity.pdf

QUINET, Emile. (2004) «A meta-analysis of Western European external costs estimates». *Transportation Research Part D.* Vol.9, No.6, pp.465-576.

REYNOLDS, G. (2004) «Operational pollution from shipping». *Shipping and Ports in the Twenty-first Century.* Routeledge, London. pp.233-256.

RICHTER, Andreas *et al.* (2004) «Satellite measurements of $NO_2$ from international shipping emissions». *Geophysical Research Letters.* Vol.31, No.L23110, 4 p.

SAXE H, LARSEN T. (2004) «Air pollution from ships in three Danish ports». *Atmospheric Environment.* Vol.38, No. 24, pp.4057-4067.

SEAAT. (2005) *Co-operation for change : An effective model for working towards sustainable shipping ?* 13 diapos. Site internet consulté le 21 février 2006. http://www.westcoastdiesel.org/files/clearinghouse-marine/Haagen-Smit%20Symposium%20SEAAT%20Prospects%20for%20Cleaner%20Fuel.pdf

SECRÉTARIAT DU CONSEIL MARITIME ET INDUSTRIEL NATIONAL. (2004) *L'industrie canadienne du transport maritime : un aperçu.* 43 p. Site internet consulté le 2 mars 2006. http://www.tc.gc.ca/pol/fr/acf/cmin/document/NMIC.pdf

SINHA, Parikhit *et al.* (2003) «Emissions of trace gases and particles from two ships in the southern Atlantic Ocean». *Atmospheric Environment.* Vol.37, No.15, pp.2139-2148.

SODES. (2003) *La mise en oeuvre du Protocole de Kyoto au Québec.* 20 p. Site internet consulté le 15 mars 2006. http://www.st-laurent.org/ressources/fichiers/memoire_kyoto_quebec_02-03.pdf

STREETS, David G. *et al.* (2000) «The growing contribution of sulfur emissions from ships in Asian waters, 1988-1995». *Atmospheric Environment.* Vol.34, No.26, pp.4425-4439.

TASCHEREAU, A. (2005) *Programme de réduction des émissions polluantes marines.* Centre de développement des transports. 20 diapos. Site internet consulté le 21 février 2006. http://www.armateurs-du-st-laurent.org/documents/ATaschereauASLjuin05.pdf

TAYLOR, Rod B. (2005) *Charting the Course: Marine Fuel Efficiency and Emissions Conference.* A report on the Proceedings. 13 p. http://www.tc.gc.ca/programs/environment/Freight/training/marine/pdf/Chart.pdf

TOWNSEND *et al.* (2005) *Report to mayor Hahn and Councilwoman Hahn. 603* p. Site internet consulté le 20 juillet 2006. http://www.portoflosangeles.org/DOC/REPORT_NNI_Final.pdf

TRAN, Hien (2006) *Quantification of the health impacts and economic valuation of air pollution from ports and goods movements in California*. 111 p. Site internet consulté le 20 juillet 2006. http://www.arb.ca.gov/planning/gmerp/march21plan/appendix_a.pdf

TRANPORT CANADA (2006) Cost-benefit analysis of marine emission control technologies. Site internet consulté le 20 juillet 2006.
http://www.tc.gc.ca/tdc/projects/marine/g/9904.htm

TRB. (2001) *Transportation, Energy, and Environmental Policy: Managing Transitions.* VIII Biennial Asilomar Conference. 284 p. Site internet consulté le 2 mars 2006.
http://trb.org/publications/conf/asilomar.pdf

TRONSTAD T. (2004) *Fuel cells in ship: Safety and reliability.* DNV research. 15 p. Site internet consulté le 21 février 2006.
http://www.dnv.com/binaries/Fuel%20Cells%20in%20Ships%20-%20Safety%20and%20Reliability_tcm4-20784.pdf

TRONSTAD T. et ENDRESEN, O. (2004) *Fellowship – Fuel cells for low emission ships.* DNV research. pp.141-149. Site internet consulté le 2 mars 2006.
http://www.risoe.dk/rispubl/SYS/syspdf/energconf05/session5_tronstad.pdf

TROZZI C et VACCARO R. (1998) *Methodologies for estimating future air pollutant emissions from ships.* Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité. 32 p. Site internet consulté le 11 juin 2006. http://www.inrets.fr/infos/cost319/MEETdel25-ship.PDF

US DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (2005) *Assessing the Effects of freight movement on air Quality at the National and Regional Level.* Site internet consulté le 11 juin 2006.
http://199.79.179.101/environment/freightaq/index.htm

WILHELMSEN W. (2005) *Environmental report 2005 Wilh. Wilhelmsen.* 19 p. Site internet consulté le 3 juillet 2006. http://hugin.info/177/R/1045578/171348.pdf

YOUNG M. (2006). *The Impact of International and Regional Air Pollution Initiatives on Diesel Engine Design and Operation.* 9 p. Site internet consulté le 3 juillet 2006.
http://seahorse.mma.edu/~techpapers/tp10.doc

ZHANG *ET AL.* (2004). *Vers une estimation des coûts sociaux-environnementaux des transports au Canada.* 27 p. Site internet consulté le 10 juillet 2006.
http://www.tc.gc.ca/pol/fr/rapport/ExamenDeLaTotaliteDesCouts/Transmodales/Transmodales003.pdf